



# Corso di Robotica (ROB)

## Modulo C. Percezione Attiva

### Il sistema somatosensoriale umano

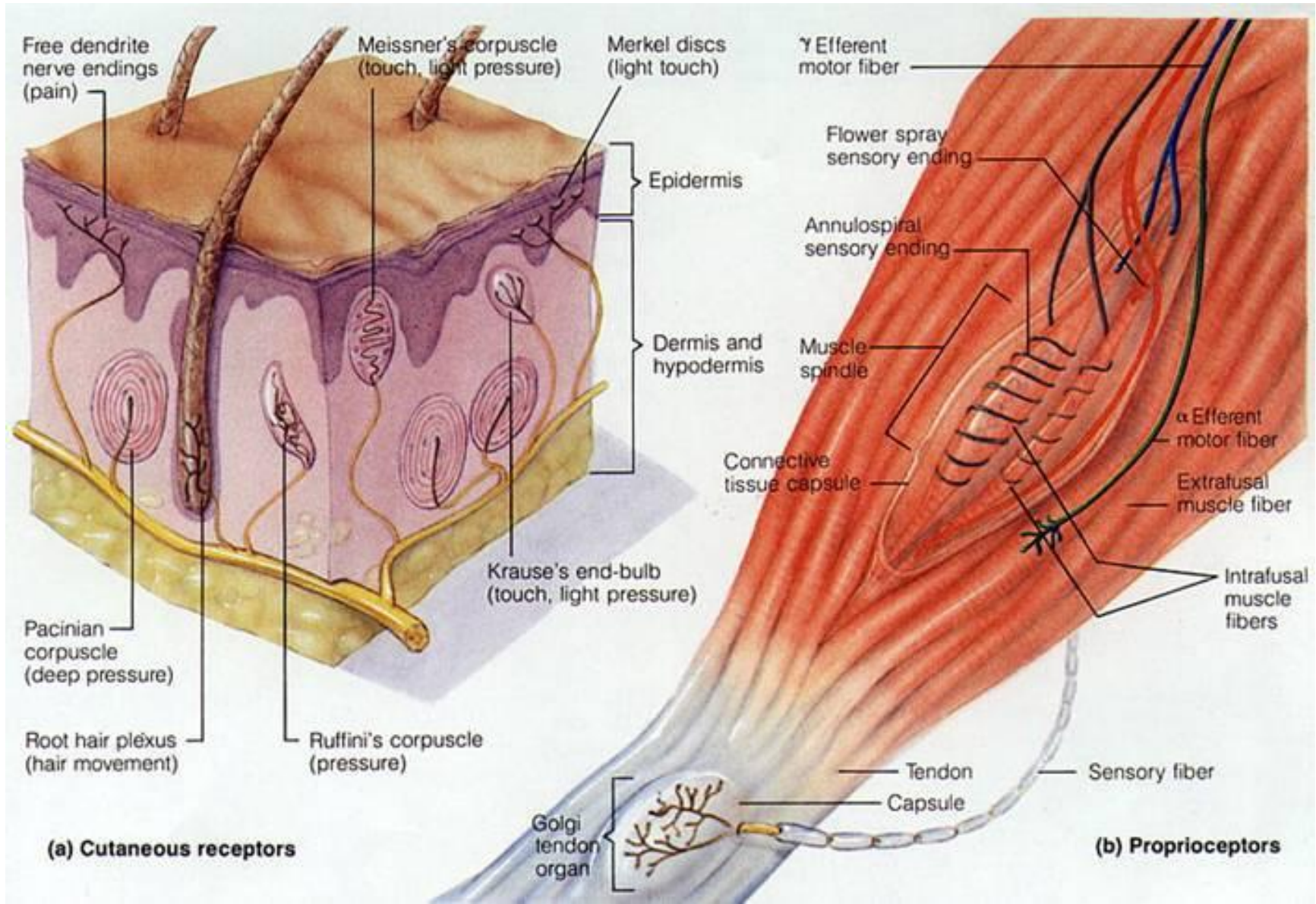
Cecilia Laschi

Istituto di BioRobotica, Scuola Superiore Sant'Anna

[cecilia.laschi@sssup.it](mailto:cecilia.laschi@sssup.it)

050-883486

# Il sistema somatosensoriale umano





# Sommario della lezione

- I recettori tattili e loro caratterizzazione
- Il polpastrello come organo sensoriale nel controllo della presa
- Caratteristiche principali dei recettori propriocettivi
- Le vie afferenti somatiche e i meccanismi di trasmissione delle informazioni sensoriali dalla periferia alle aree centrali

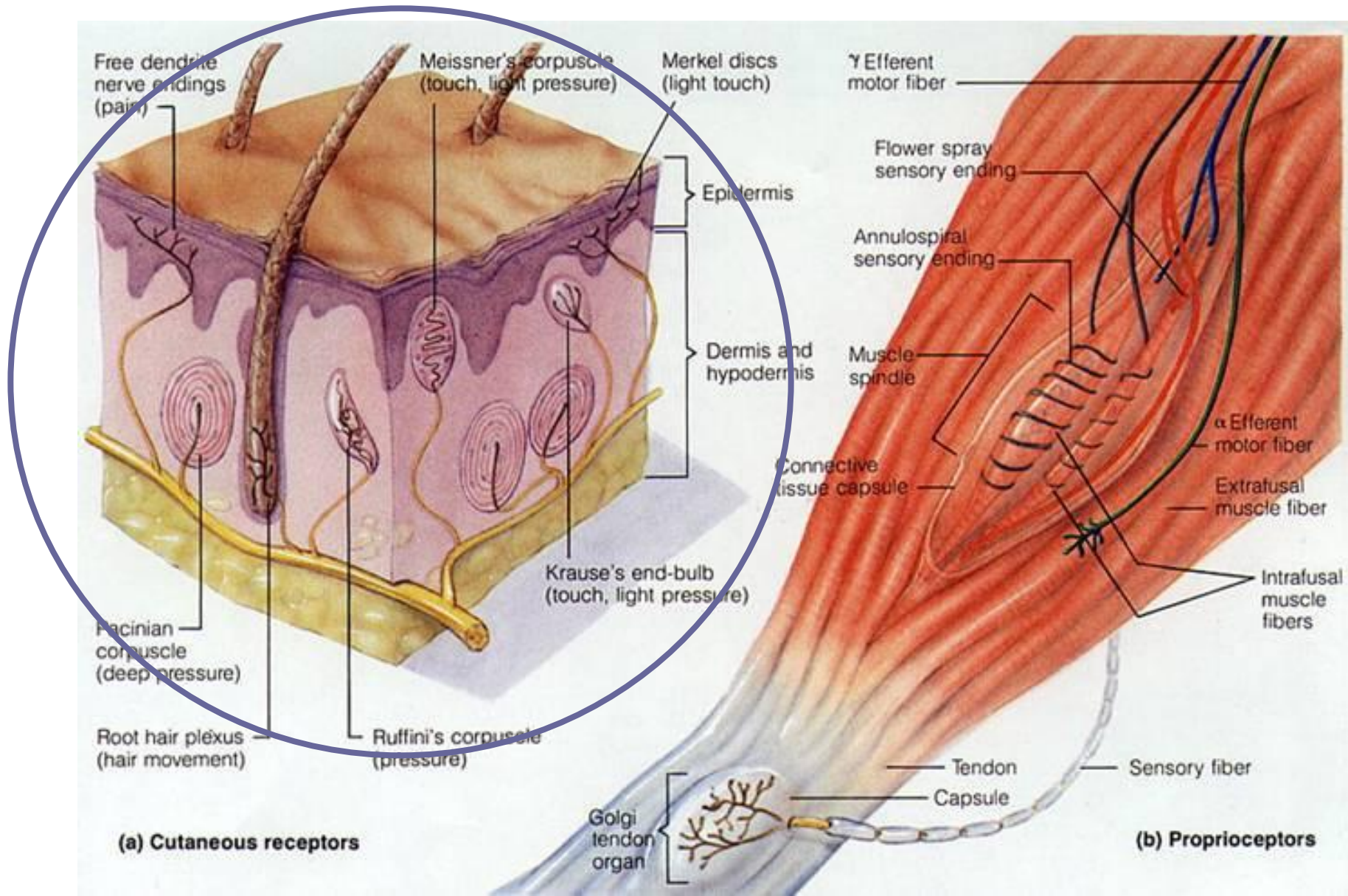


# Sommario della lezione

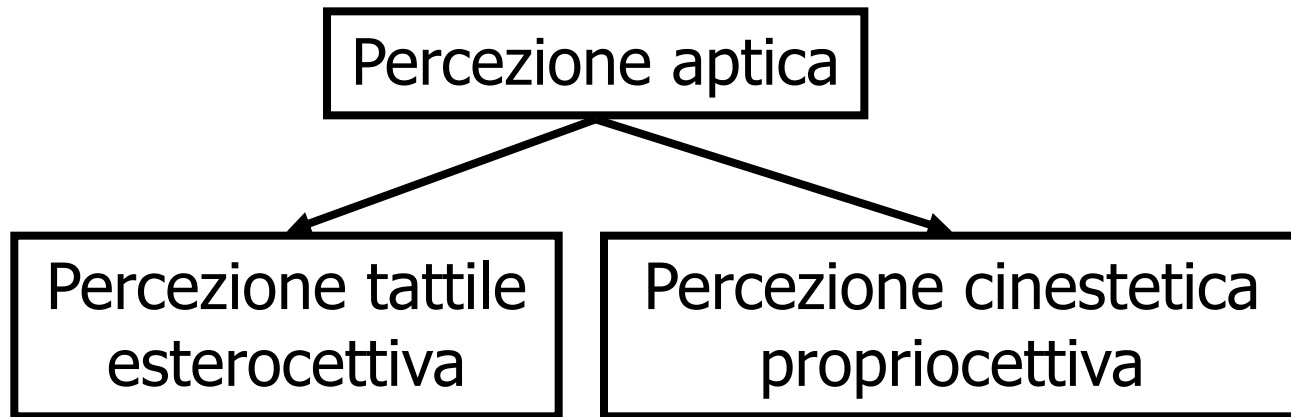
- **I recettori tattili e loro caratterizzazione**
- Il polpastrello come organo sensoriale nel controllo della presa
- Caratteristiche principali dei recettori propriocettivi
- Le vie afferenti somatiche e i meccanismi di trasmissione delle informazioni sensoriali dalla periferia alle aree centrali



# Il sistema somatosensoriale umano



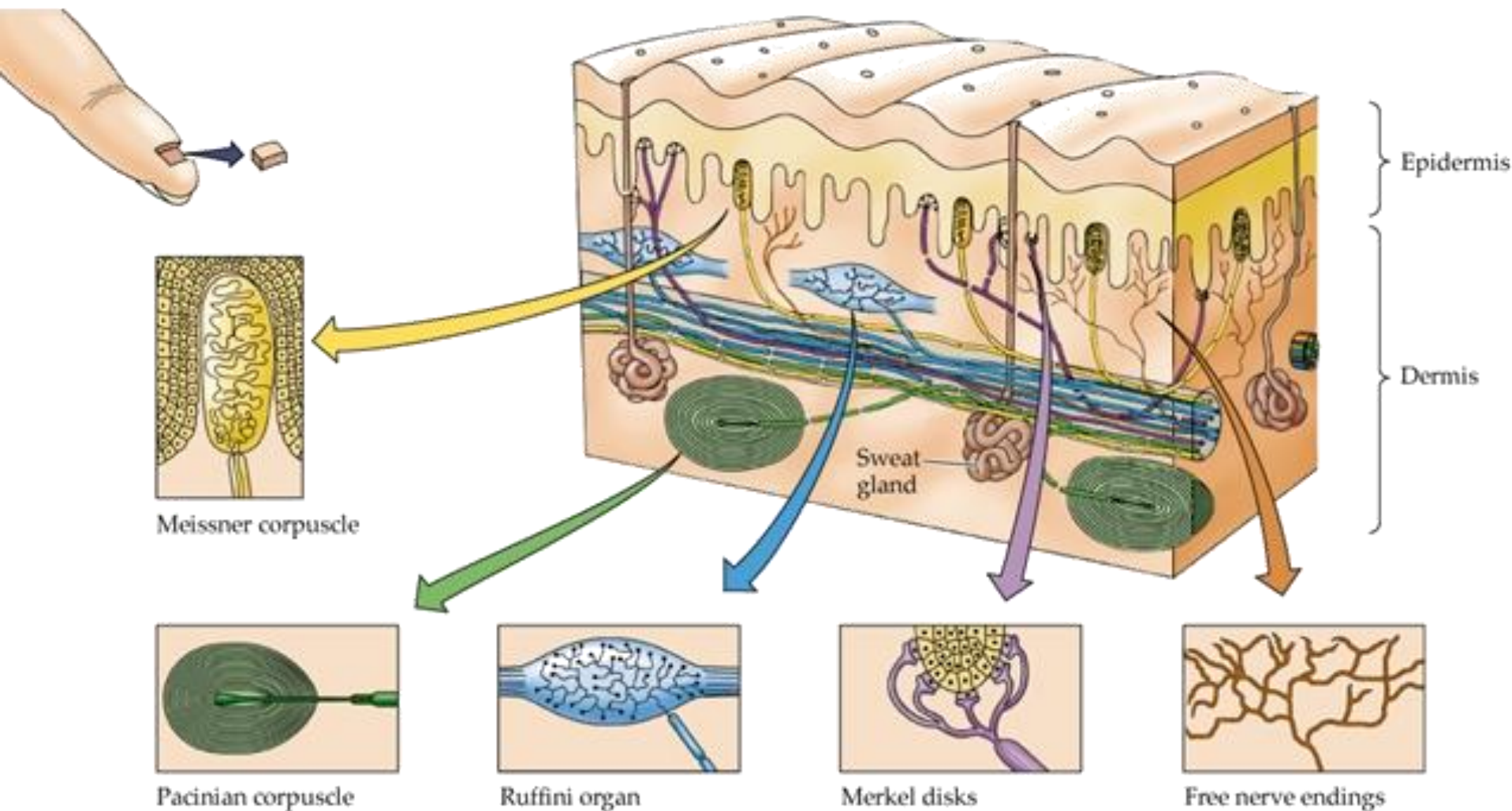
# Il sistema somatosensoriale umano



Integrazione di:

- **Esterocezione** (o percezione tattile):  
percezione di quantità fisiche misurate nell'ambiente esterno, come forze, temperature, ecc.
- **Propriocezione** (o percezione cinestetica):  
percezione di quantità fisiche che indicano lo stato interno del corpo umano, come livello di contrazione muscolare, stiramento di tendini e legamenti, ecc.

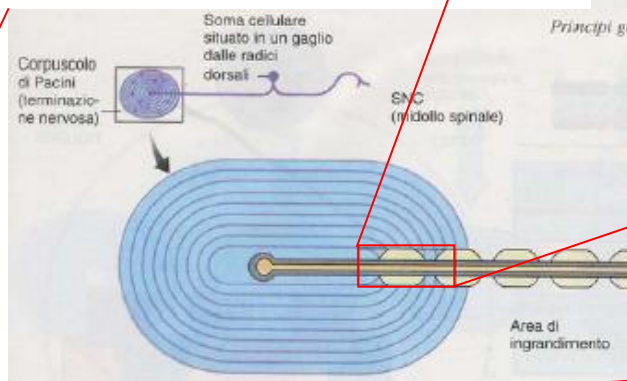
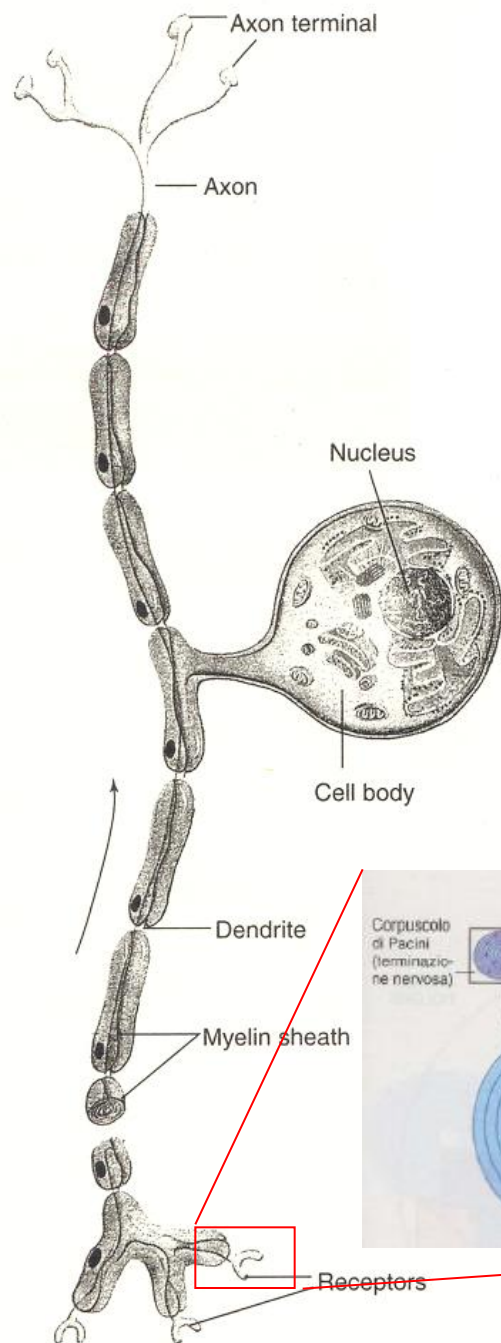
# I meccanocettori nella pelle glabra



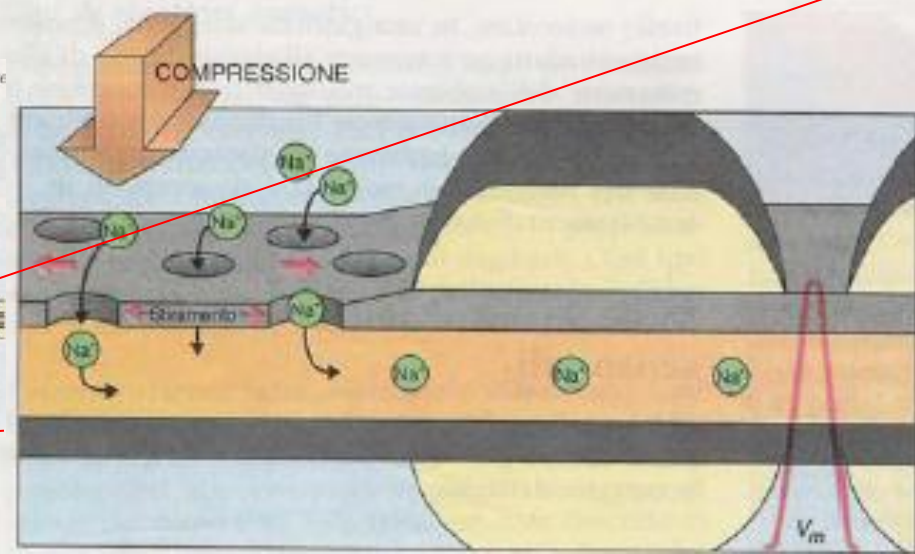
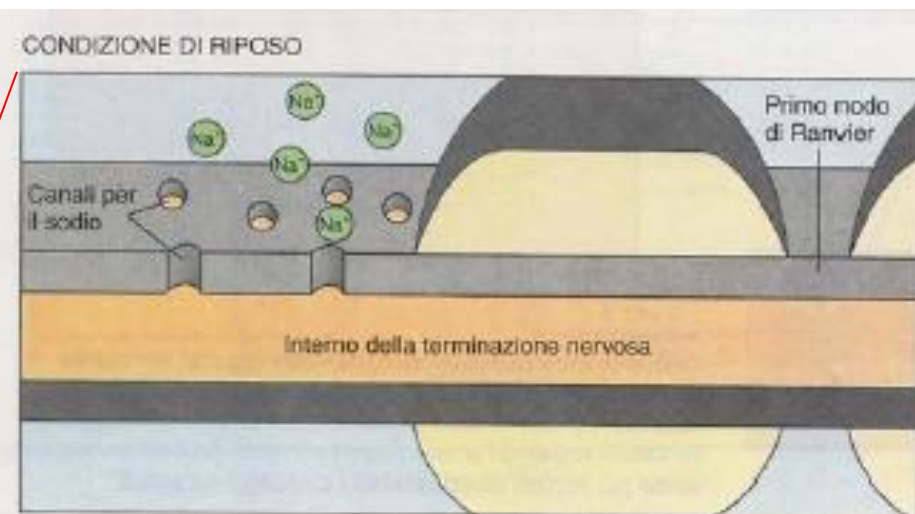


Afferent (sensory) neuron

# Meccanismo di stimolazione meccanica



Principi ge



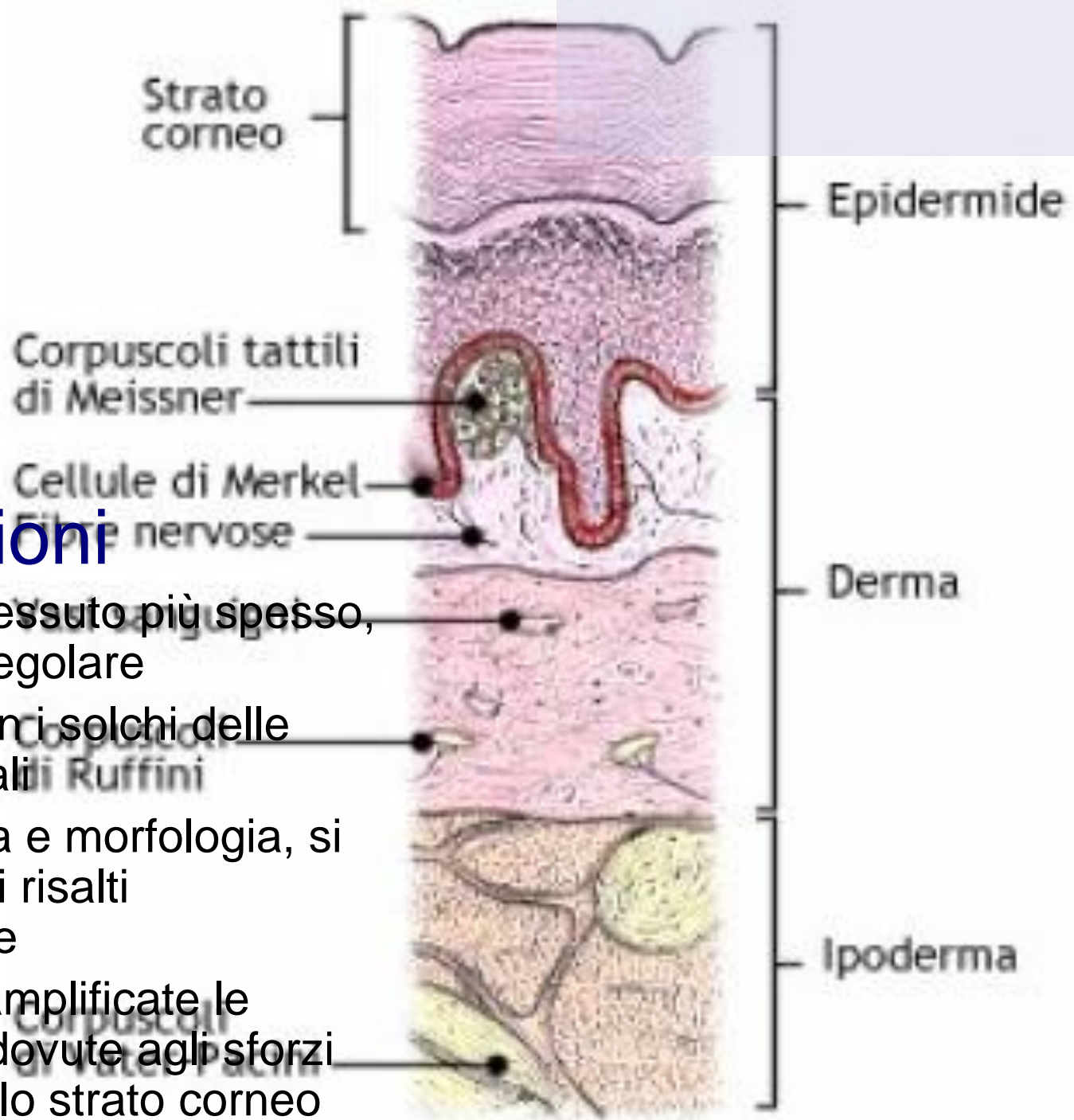


# Strato cor

- Cellule robuste  
l'alto dal proc  
del tessuto
- Le sue caratte  
meccaniche c  
distribuzione  
zone sottosta

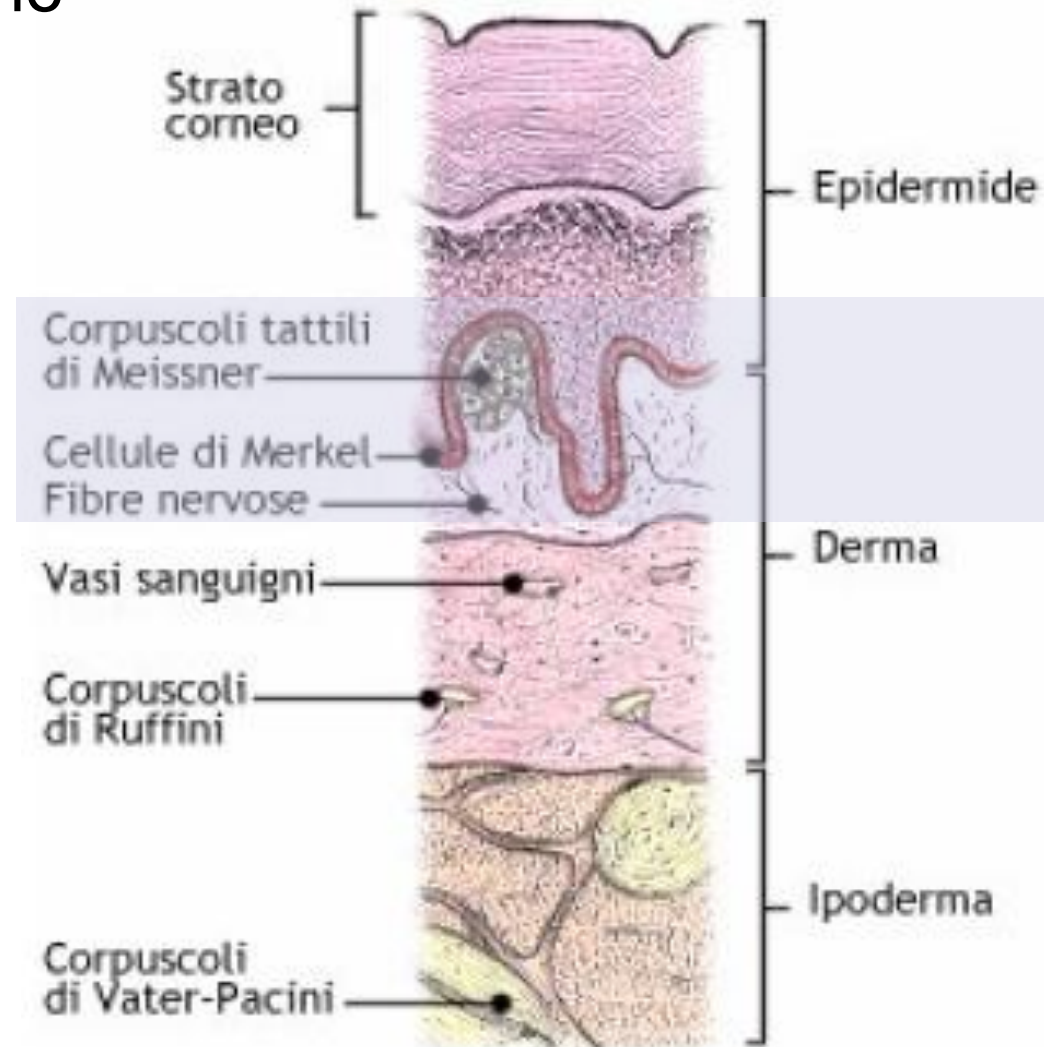
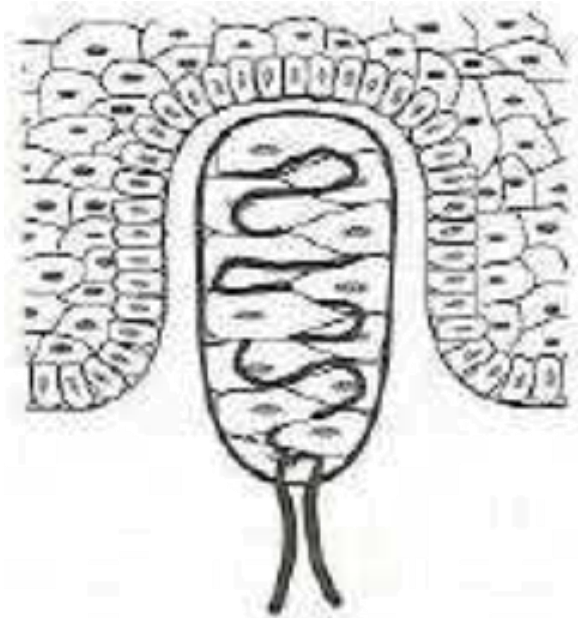
## Estroflessioni

- Costituite da tessuto più spesso,  
dalla forma irregolare
- Coincidenti con i solchi delle  
impronte digitali
- Per loro natura e morfologia, si  
muovono con i risalti  
dell'epidermide
- Trasmettono amplificate le  
deformazioni dovute agli sforzi  
tangenziali sullo strato corneo

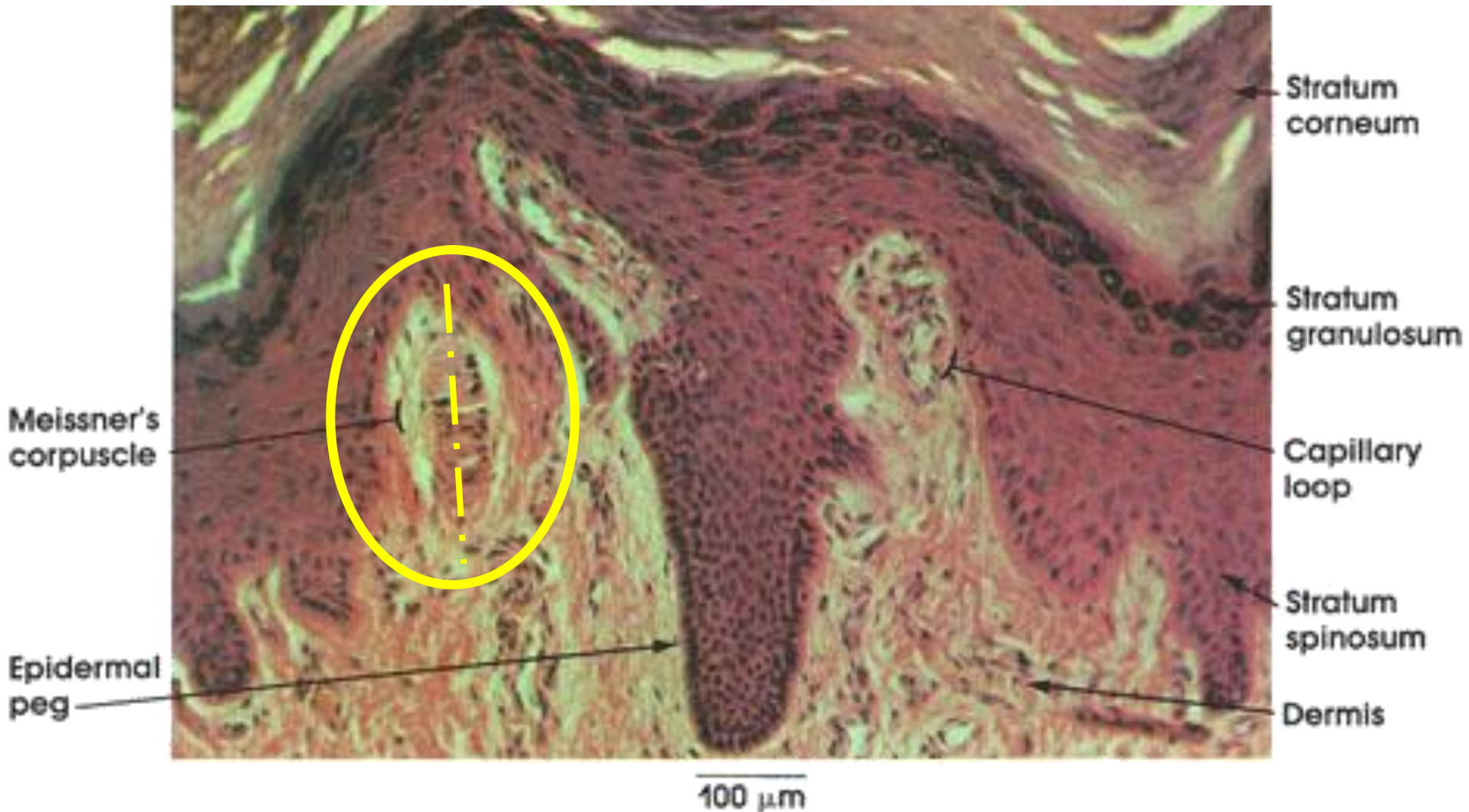


# Corpuscoli di Meissner

- 43% unità tattili della mano
- dimensioni:  $80 \times 30 \mu\text{m}$
- asse maggiore perpendicolare alla superficie della pelle
- soglia:  $10,2 \text{ mN/mm}^2$



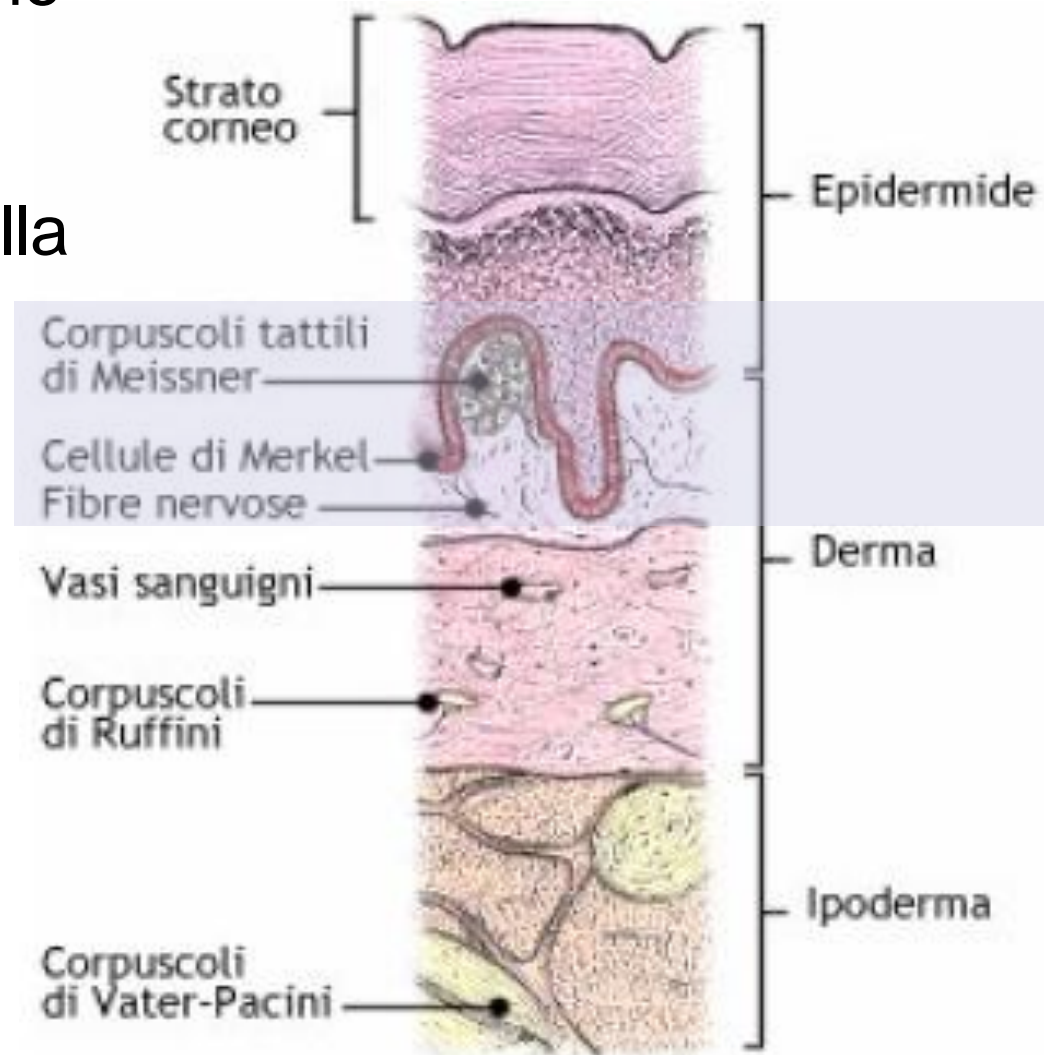
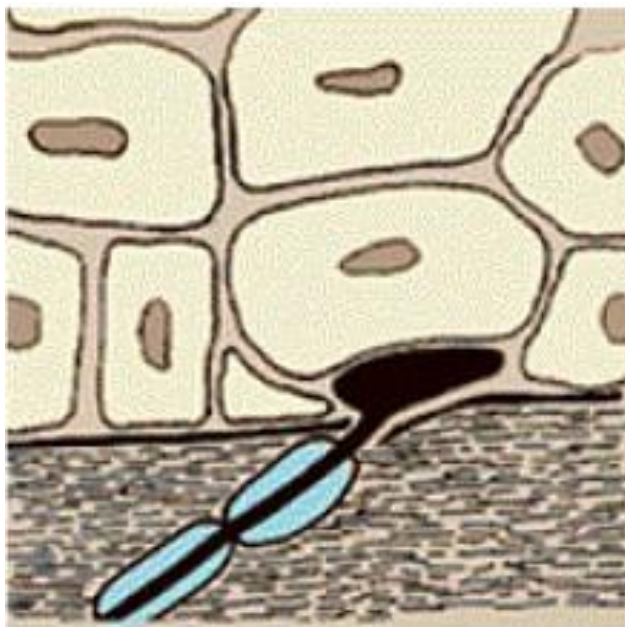
# Corpuscoli di Meissner





# Dischi di Merkel

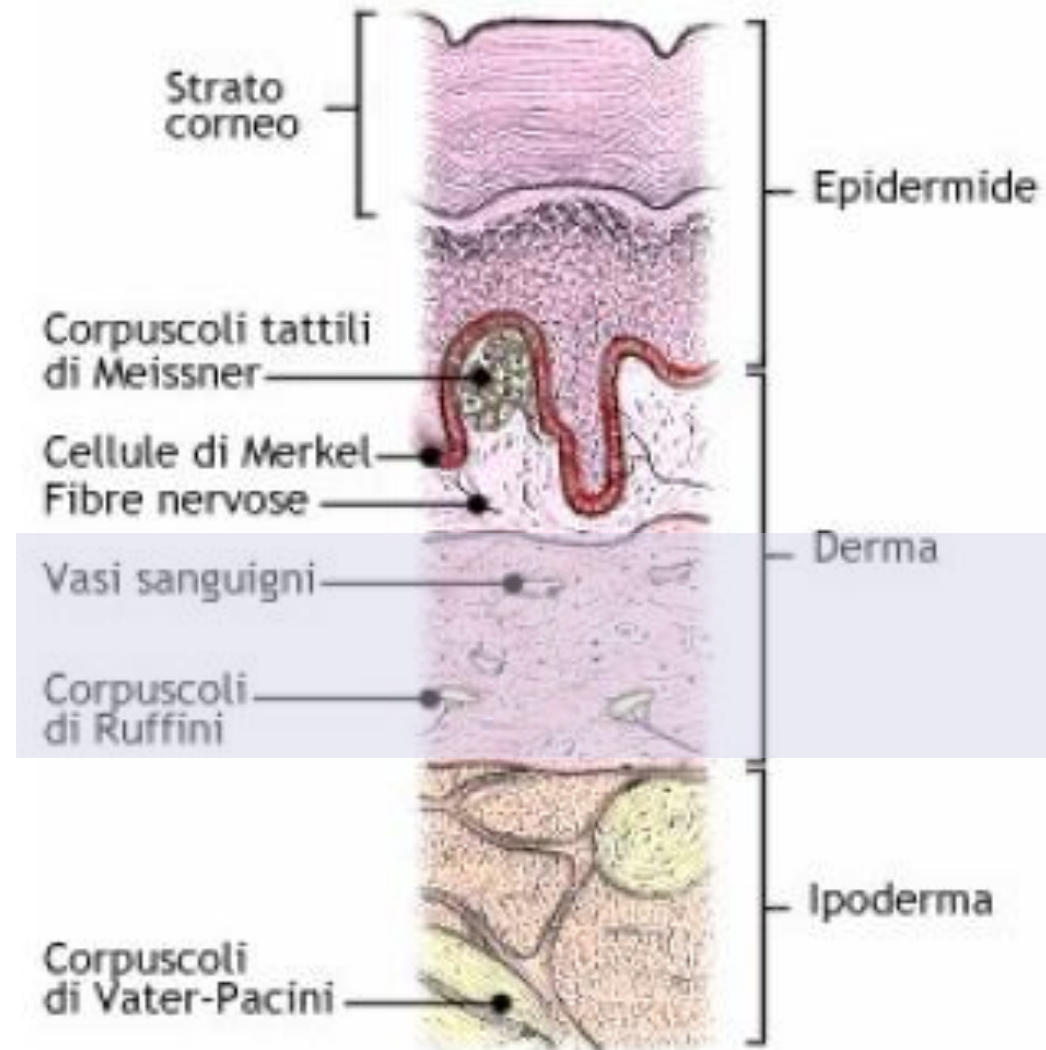
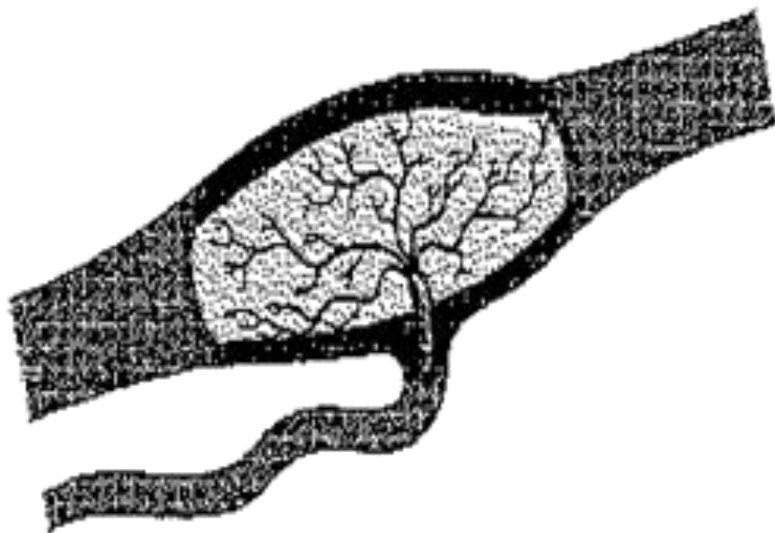
- 25% unità tattili della mano
- struttura discoforme
- 10-15  $\mu\text{m}$  di diametro
- disposti parallelamente alla superficie della pelle
- soglia: 22,8  $\text{mN/mm}^2$





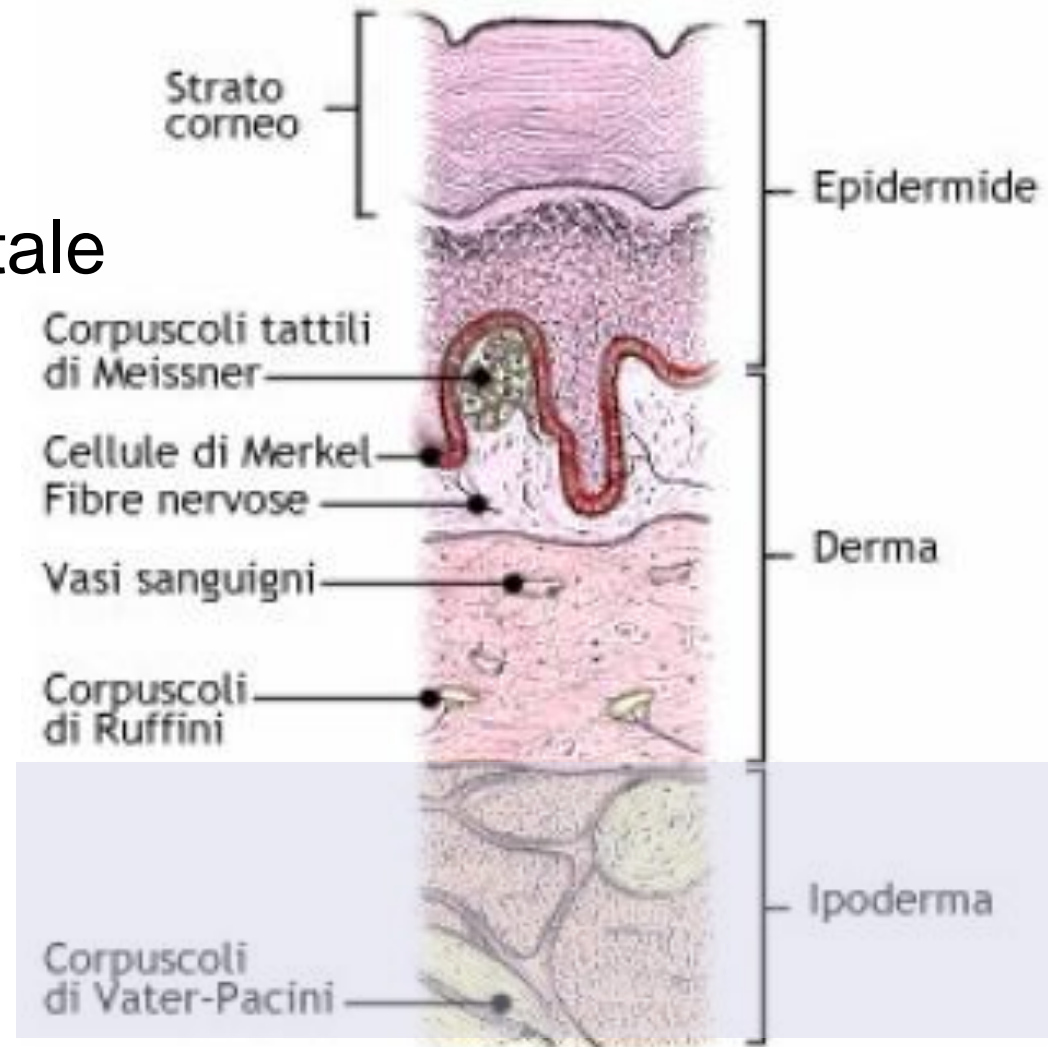
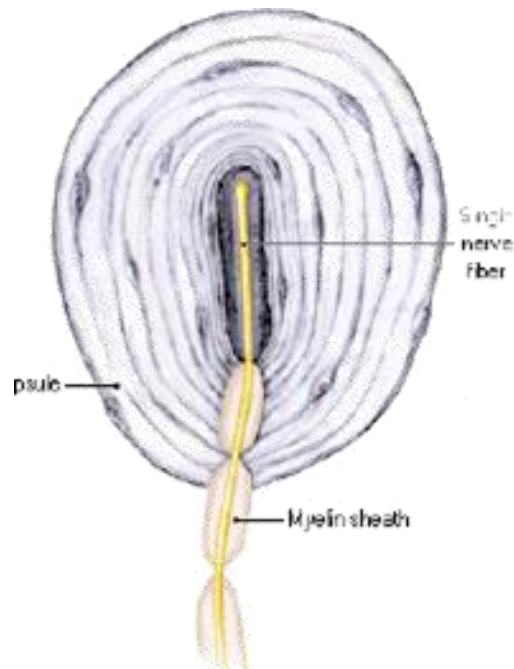
# Corpuscoli di Ruffini

- 19% unità tattili della mano
- soglia: 131,6 mN/mm<sup>2</sup>

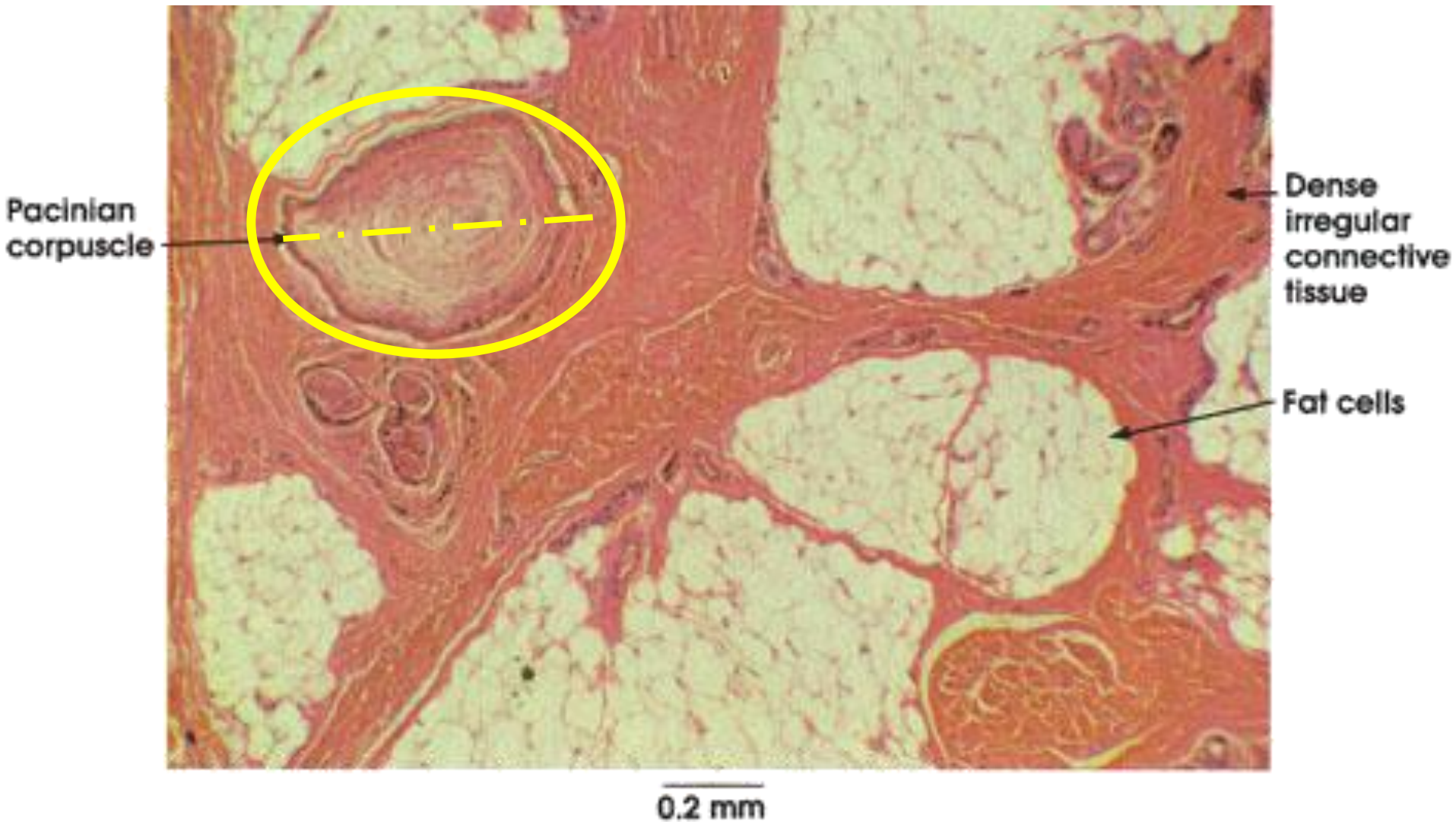


# Corpuscoli di Pacini

- 13% unità tattili della mano
- lunghezza: 1-4 mm
- diametro: 0,5-1 mm
- asse maggiore orizzontale
- soglia: 9,5 mN/mm<sup>2</sup>



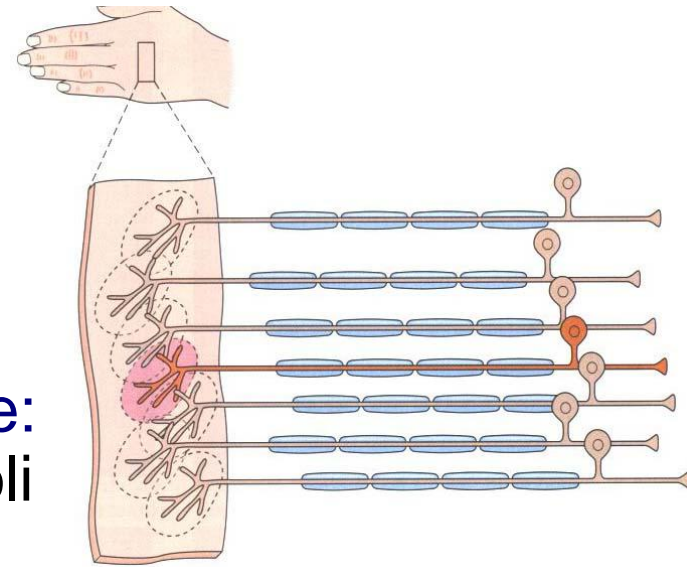
# Corpuscoli di Pacini





# Campi recettivi

- Campo recettivo di un recettore: area cutanea dalla quale il recettore riceve stimoli
- Campo recettivo di un neurone afferente: area cutanea dalla quale ricevono stimoli i suoi recettori

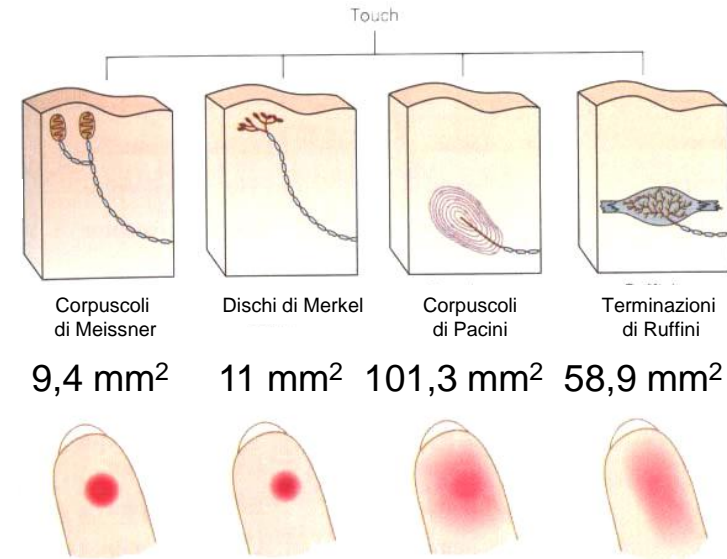


*Se la pelle viene stimolata in due punti appartenenti allo stesso campo recettivo, la differenza spaziale non viene percepita*

⇒ La dimensione del campo recettivo determina la risoluzione spaziale con cui gli stimoli sono percepiti

La sovrapposizione tra campi recettivi aumenta la risoluzione spaziale, fino a 2 mm sul polpastrello

- La dimensione del campo recettivo di un **recettore** aumenta con la profondità del recettore nell'epidermide





# Dimensione dei campi recettivi

Receptive field size increases with the receptor's depth in skin.

Pacinian receptors are deep in the skin and have the largest receptive fields (r.f.).

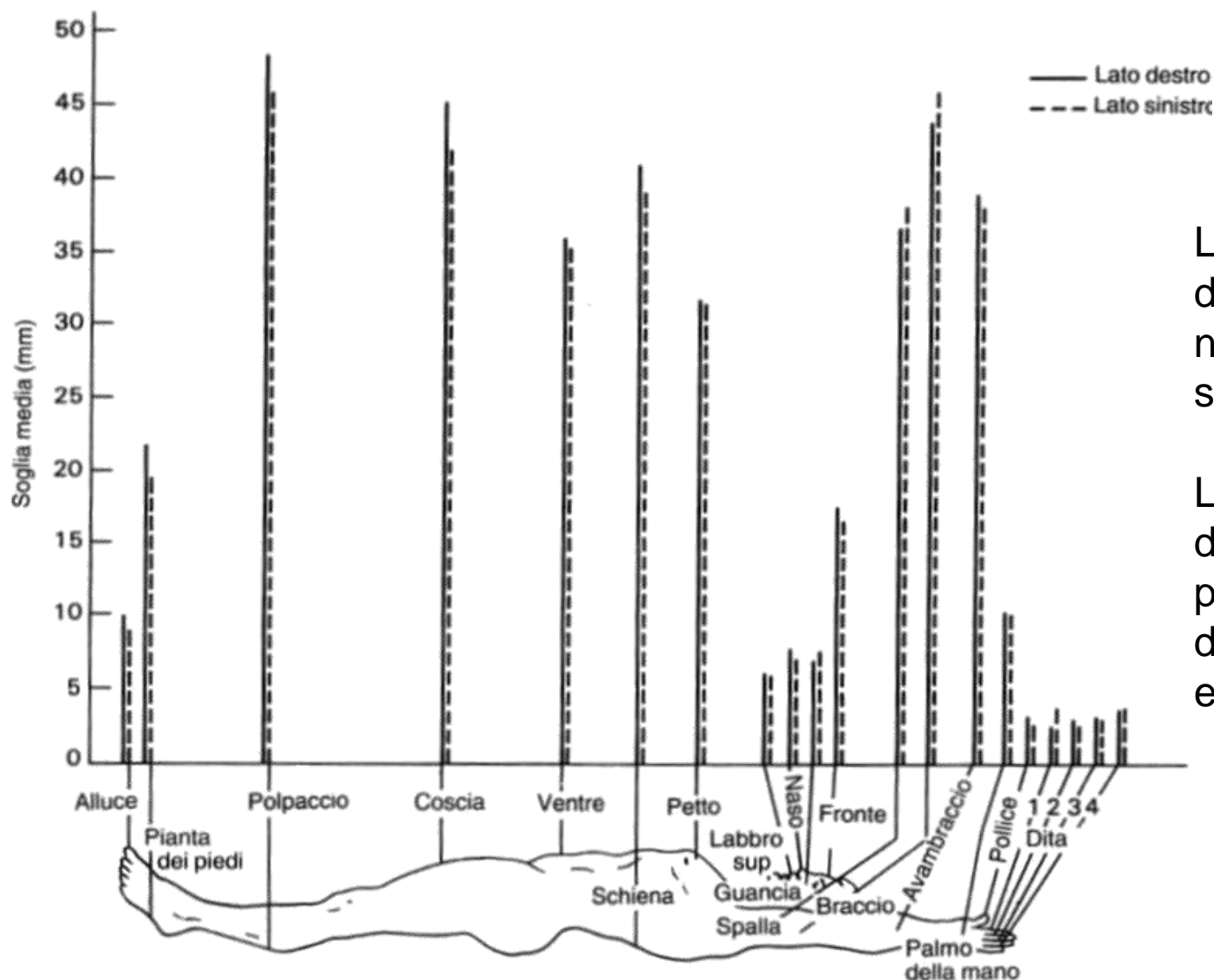


small r.f.  
Meissner



large r.f.  
Pacinian

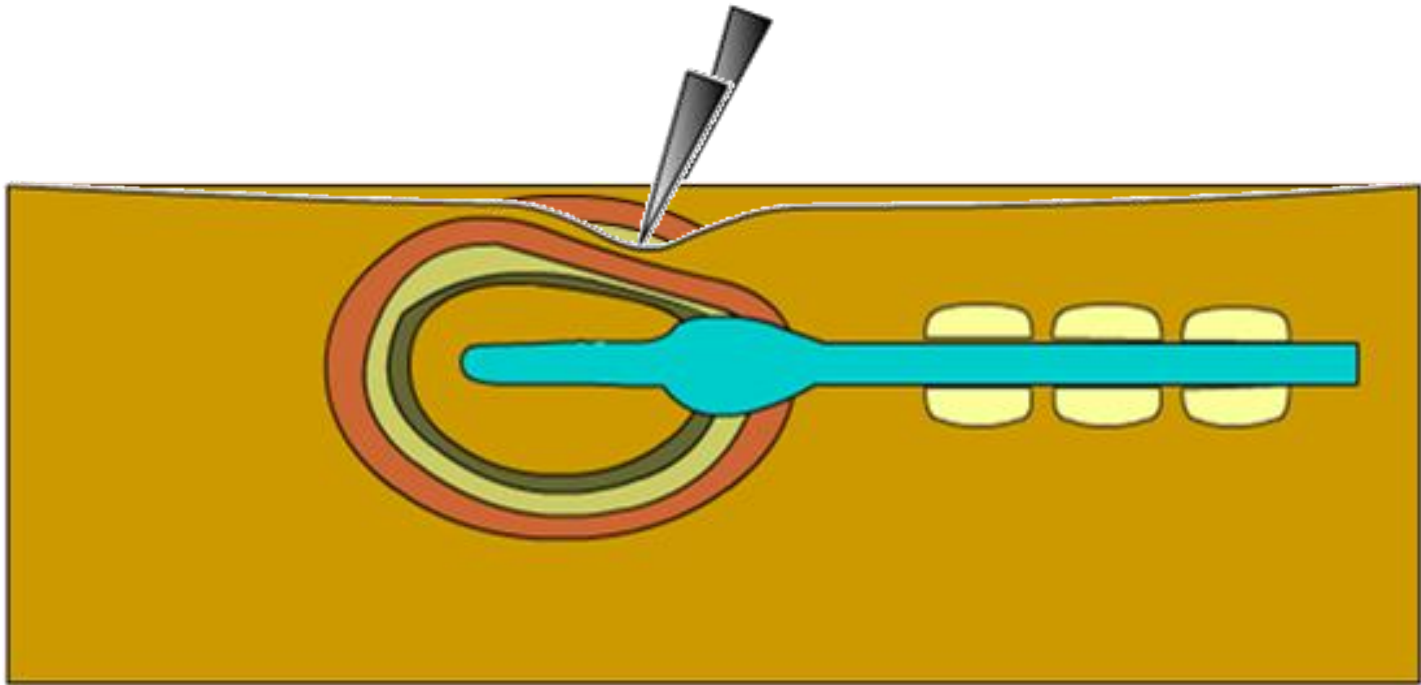
# Dimensione dei campi recettivi



La discriminazione dei due punti è diversa nelle varie zone della superficie corporea.

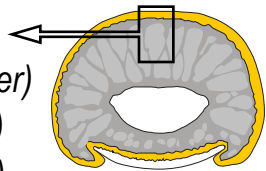
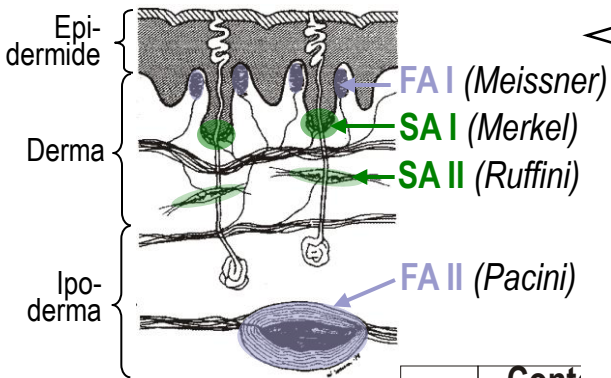
La massima capacità discriminativa è posseduta dalla punta delle dita, dalle labbra e dalla lingua

# Meccanismo di adattamento allo stimolo



La capacità e la velocità di adattamento allo stimolo dipendono dalla morfologia e dalle proprietà meccaniche (elasticità) dei tessuti che rivestono la terminazione nervosa

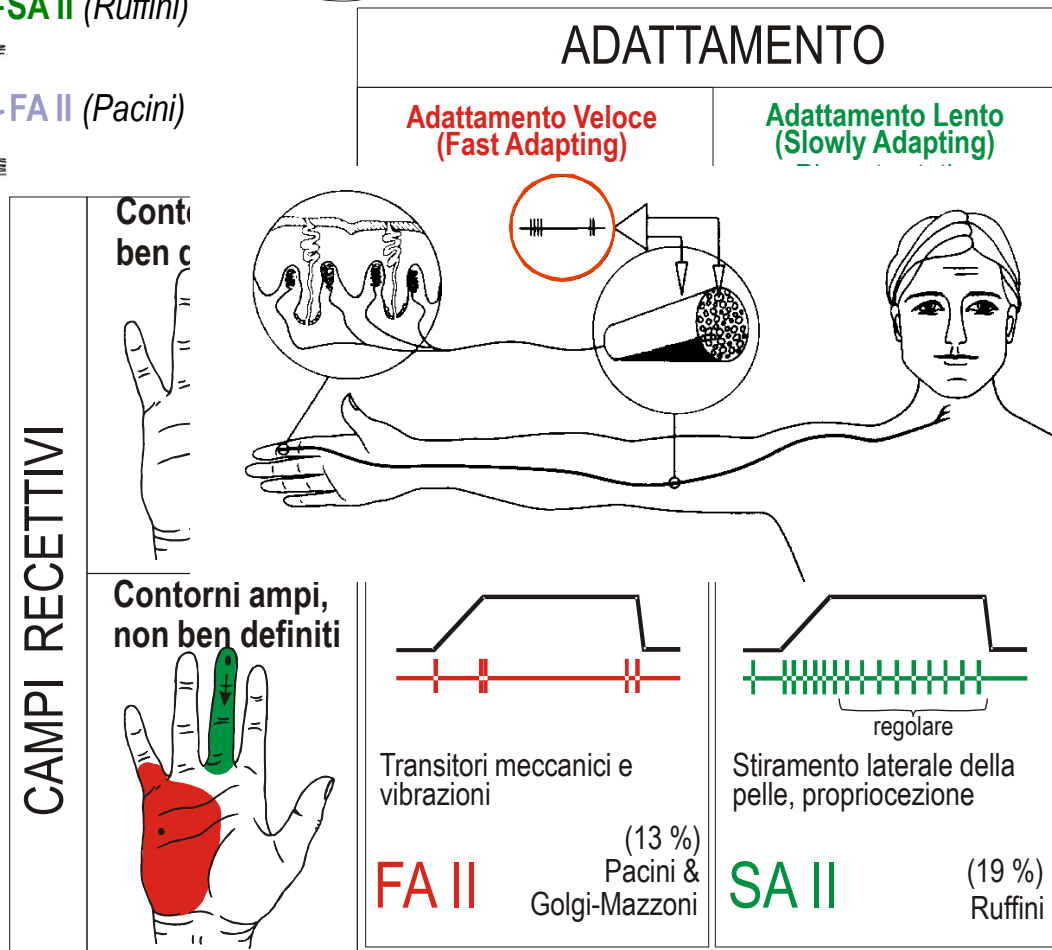
# Classificazione dei meccanocettori



Complessi meccanismi di filtraggio da parte dei tessuti, che determinano le proprietà di codifica dei recettori



Quattro tipi di recettori codificano aspetti diversi della deformazione dei polpastrelli





# Caratterizzazione quantitativa della sensibilità tattile umana

- **Soglia appena percettibile** (JND = Just Noticeable Difference): minima differenza percepibile tra due stimoli

$$\text{JND} = K m$$

con  $K$  costante e  $m$  = stimolo minore

- Legge di Weber-Fechner: modello della **sensazione di intensità**

$$S = K \log m$$

⇒ la sensazione di variazione è la stessa per variazioni proporzionali dello stimolo, indipendentemente dall'intensità degli stimoli

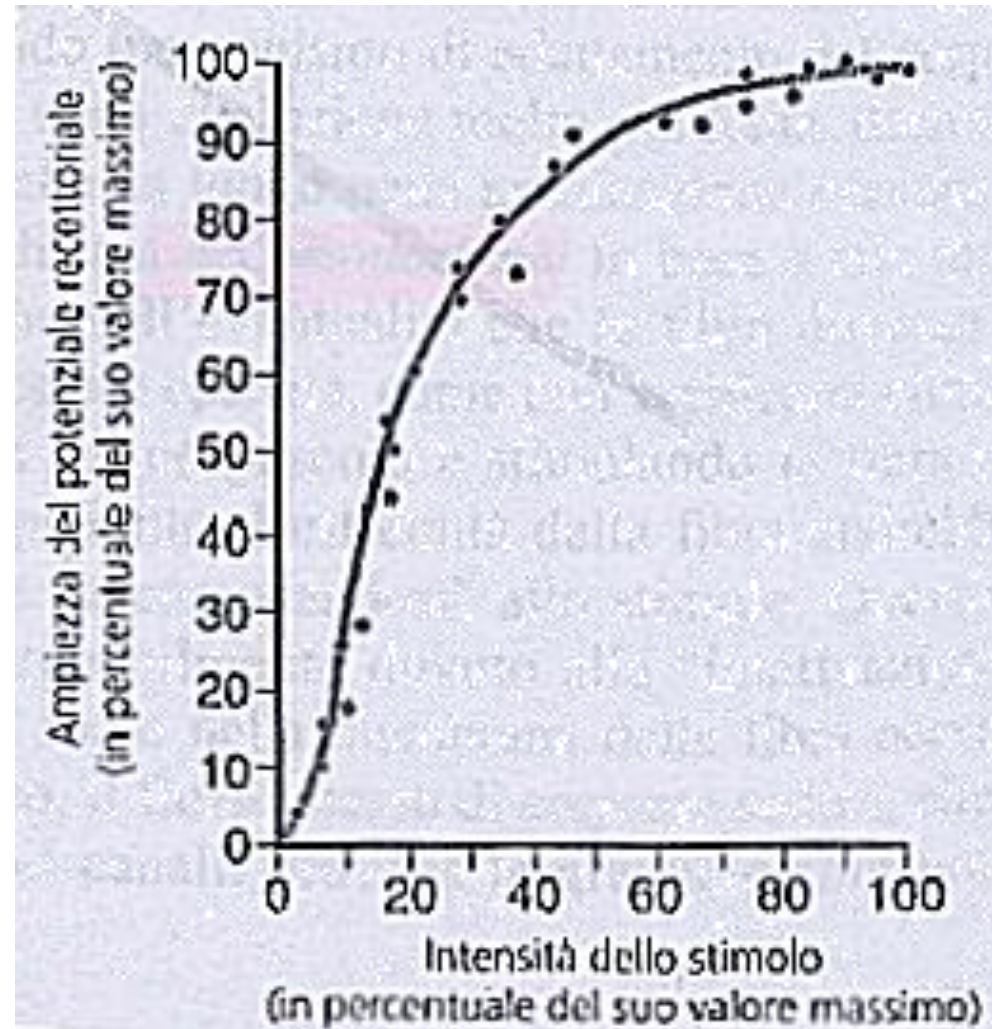
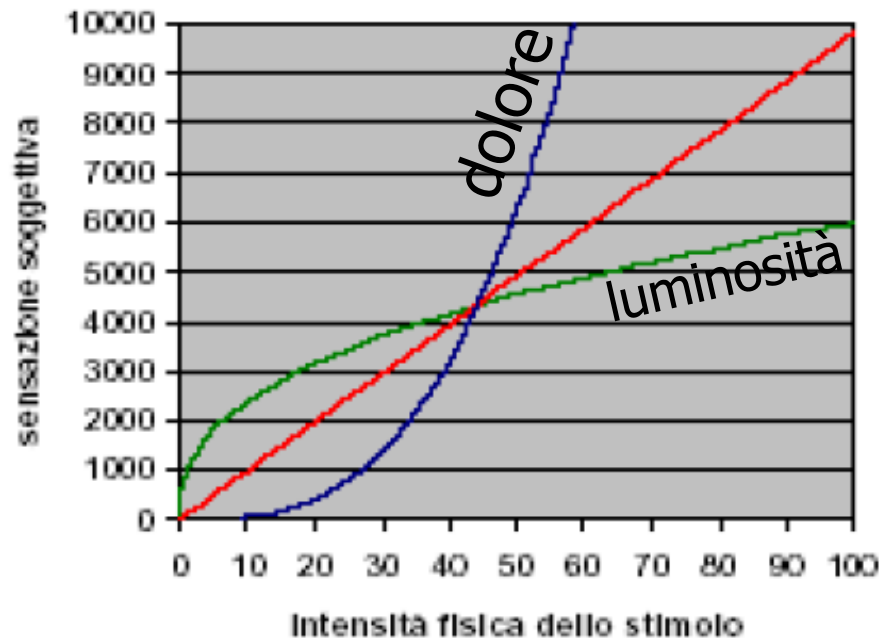
- Modifica di Stevens:

$$S = K m^b$$

con  $b$  compreso tra 0 e 1

# Relazione tra intensità dello stimolo e potenziale recettoriale

- La sensibilità tattile è maggiore per stimoli di minore intensità



# Sintesi delle caratteristiche dei meccanocettori

AFFERENTE TATTILE	CLASSE	CAMPO RECETTIVO (diametro)	FUNZIONE	FREQUENZA	SOGLIA DI RISPOSTA* (pressione)	RUOLO
<b>MEISSNER</b>	FA-I	9,4 mm <sup>2</sup> (3,4 mm)	BORDI SOTTILI, BEN DEFINITI	8-64 Hz	0,58 mN (10,2 mN/mm <sup>2</sup> )	SCIVOLAMENTO INCIPIENTE, FORME LOCALI, FORZE SUL POLPASTRELLO, VARIAZIONI DELLA FORZA E VELOCITA' DI VARIAZIONE
<b>MERKEL</b>	SA-I	11 mm <sup>2</sup> (3,7 mm)	BORDI SOTTILI, BEN DEFINITI	2-32 Hz	1,3 mN (22,8 mN/mm <sup>2</sup> )	CONTORNI DEGLI OGGETTI, FORZE SUL POLPASTRELLO, INTENSITA', VIBRAZIONI
<b>RUFFINI</b>	SA-II	58,9 mm <sup>2</sup> (8,7 mm)	BORDI AMPI, NON BEN DEFINITI	< 8 Hz	7,5 mN (131,6 mN/mm <sup>2</sup> )	STIRAMENTI LATERALI DELLA PELLE, FORZE SUL POLPASTRELLO
<b>PACINI</b>	FA-II	101,3 mm <sup>2</sup> (11,4 mm)	BORDI AMPI, NON BEN DEFINITI	64-400 Hz	0,54 mN (9,5 mN/mm <sup>2</sup> )	TRANSITORI MECCANICI, VIBRAZIONI

Il 90% dei recettori di tipo SA-I e FA-I risponde a uno stimolo di 5 mN\*, ovvero di 87mN/mm<sup>2</sup>

\*forza applicata con un Von Frey hair, del diametro di 0,27 mm

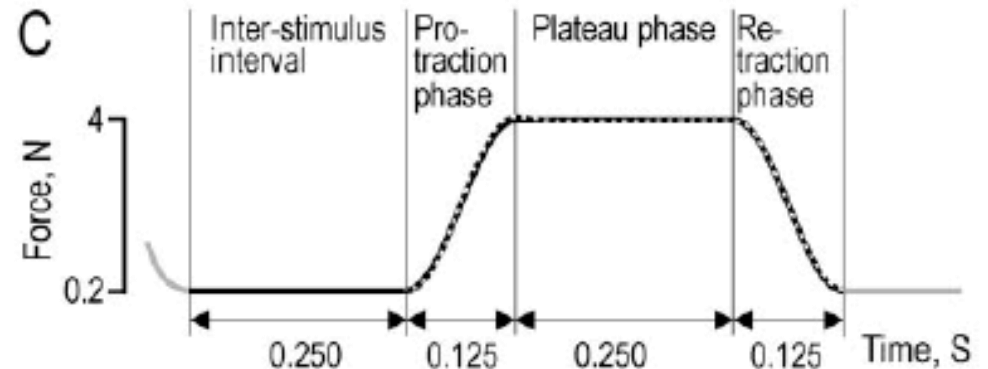
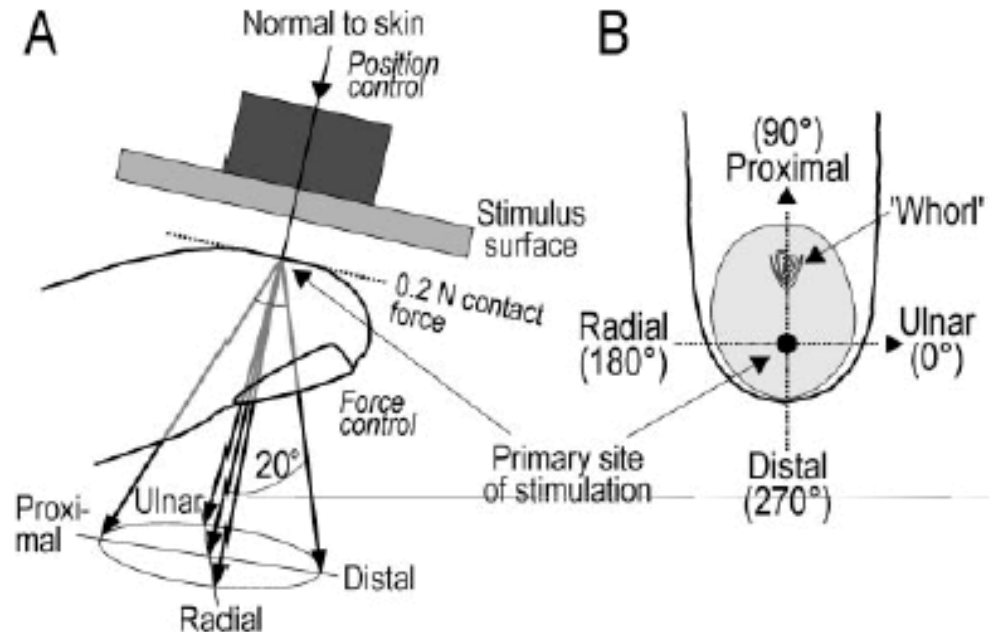
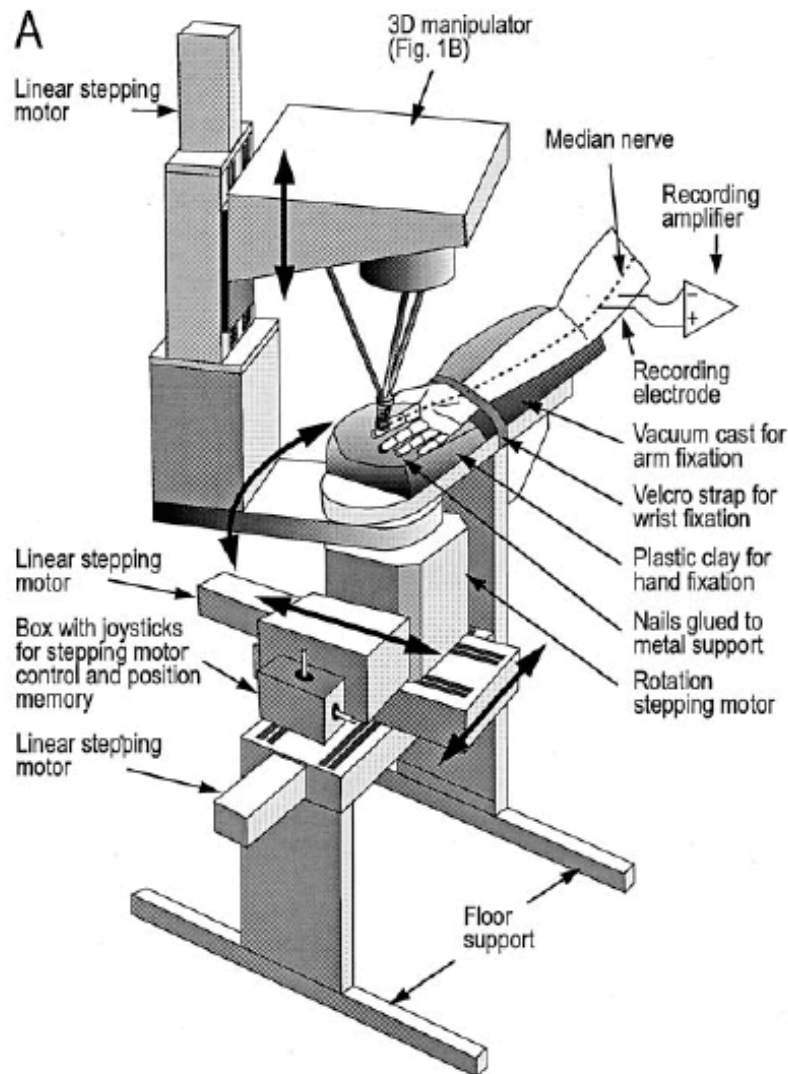


# Sommario della lezione

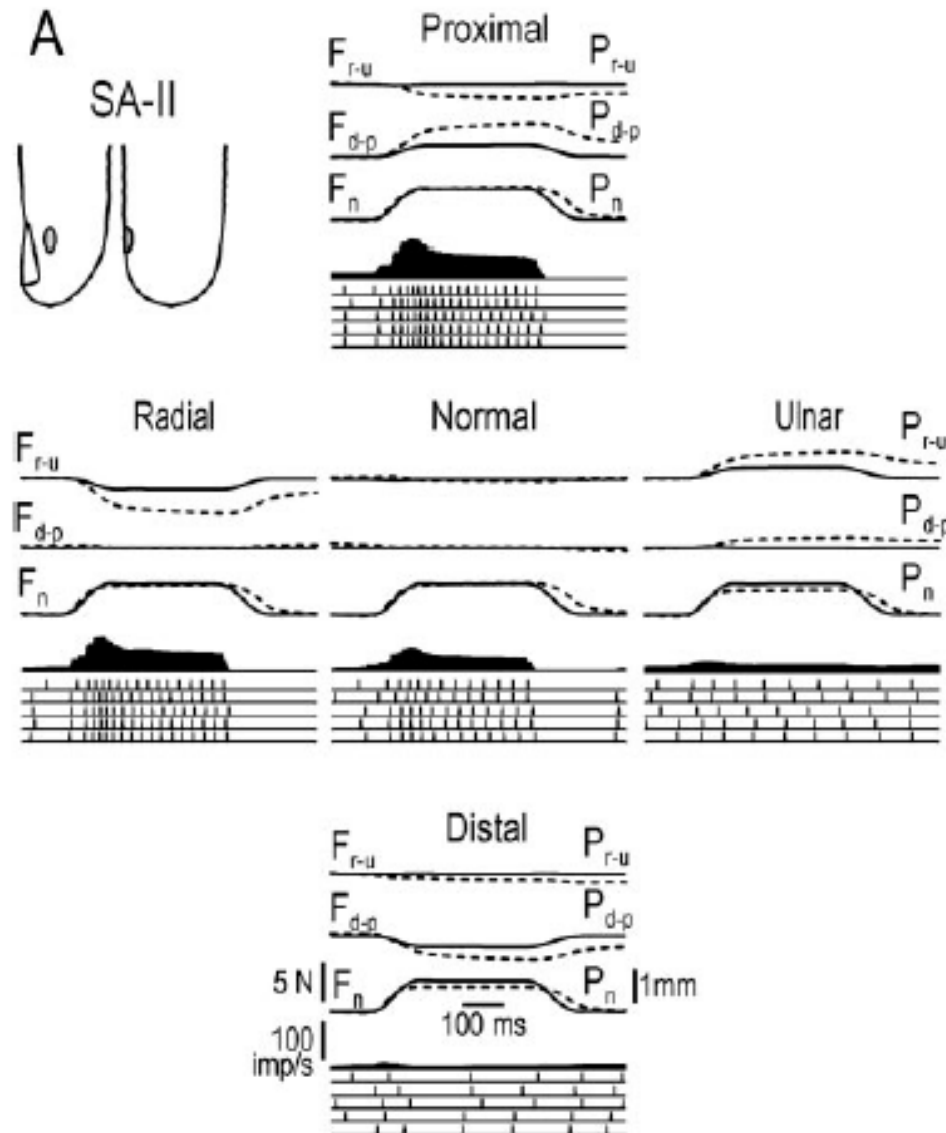
- I recettori tattili e loro caratterizzazione
- Il polpastrello come organo sensoriale nel controllo della presa
- Caratteristiche principali dei recettori propriocettivi
- Le vie afferenti somatiche e i meccanismi di trasmissione delle informazioni sensoriali dalla periferia alle aree centrali



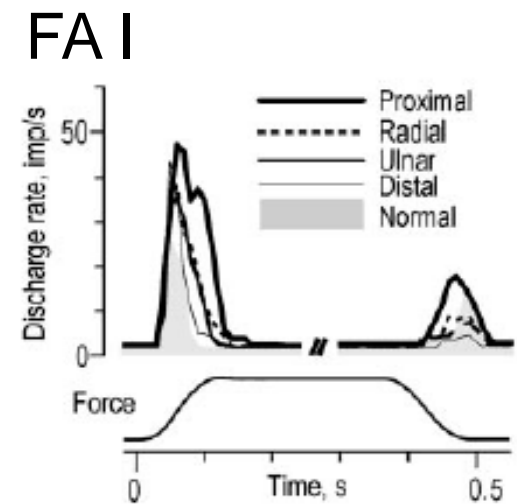
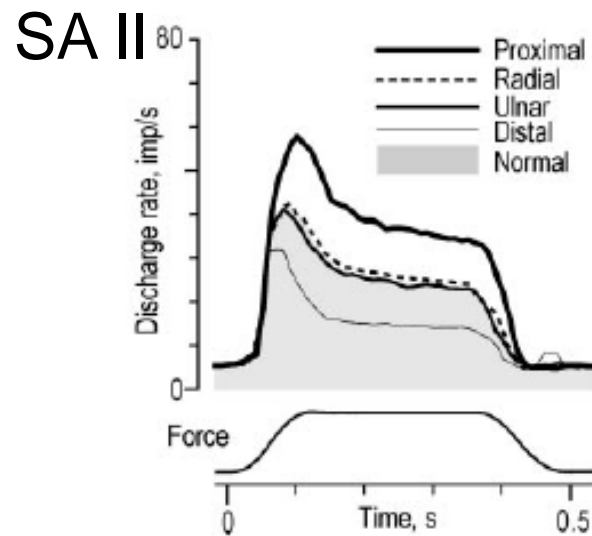
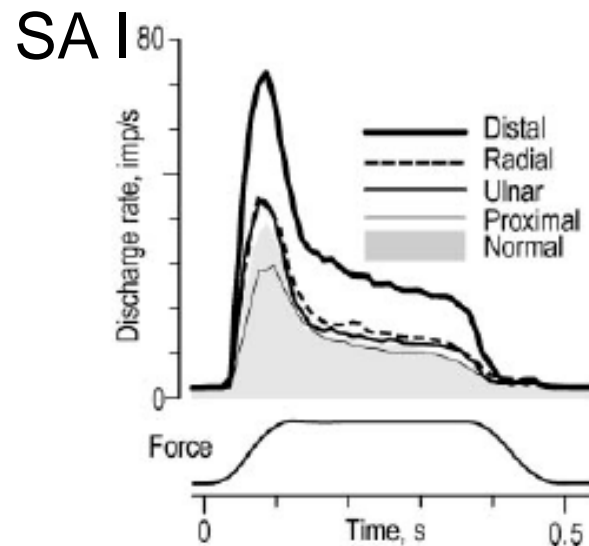
# Caratterizzazione delle risposte alla forza applicata sulla punta delle dita



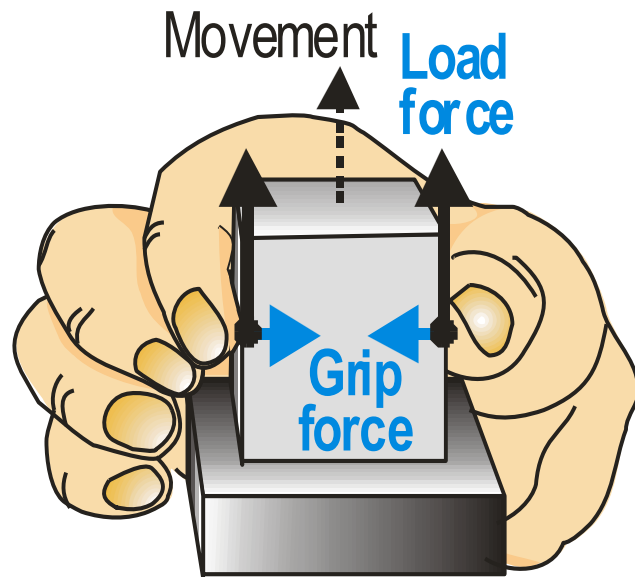
# Risposte dei recettori SA-I, FA-I e SA-II alla forza applicata sulla punta delle dita



# Risposte dei recettori SA-I, FA-I e SA-II alla forza applicata sulla punta delle dita

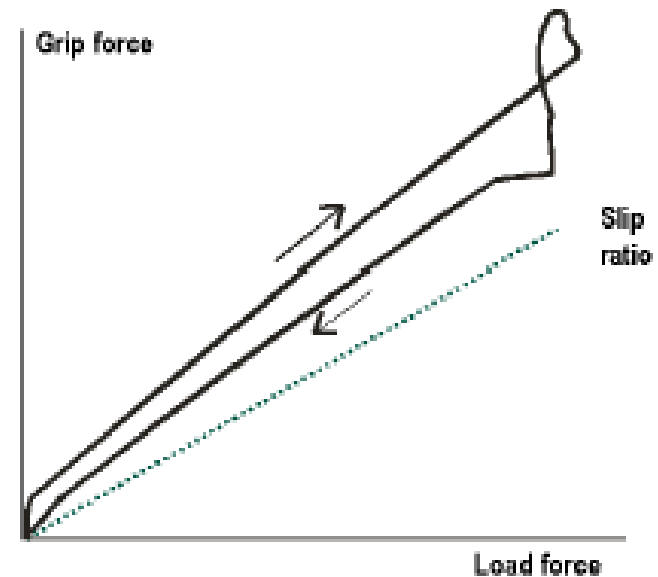
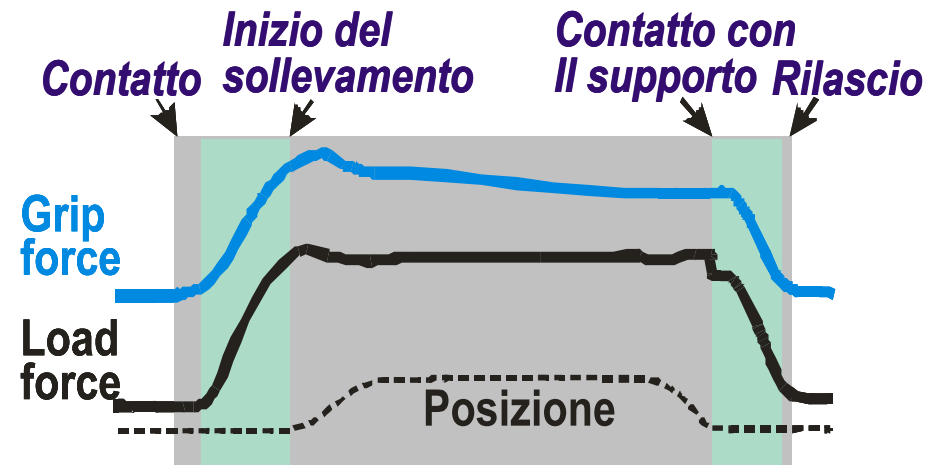


# Il ruolo del tatto nel controllo della presa



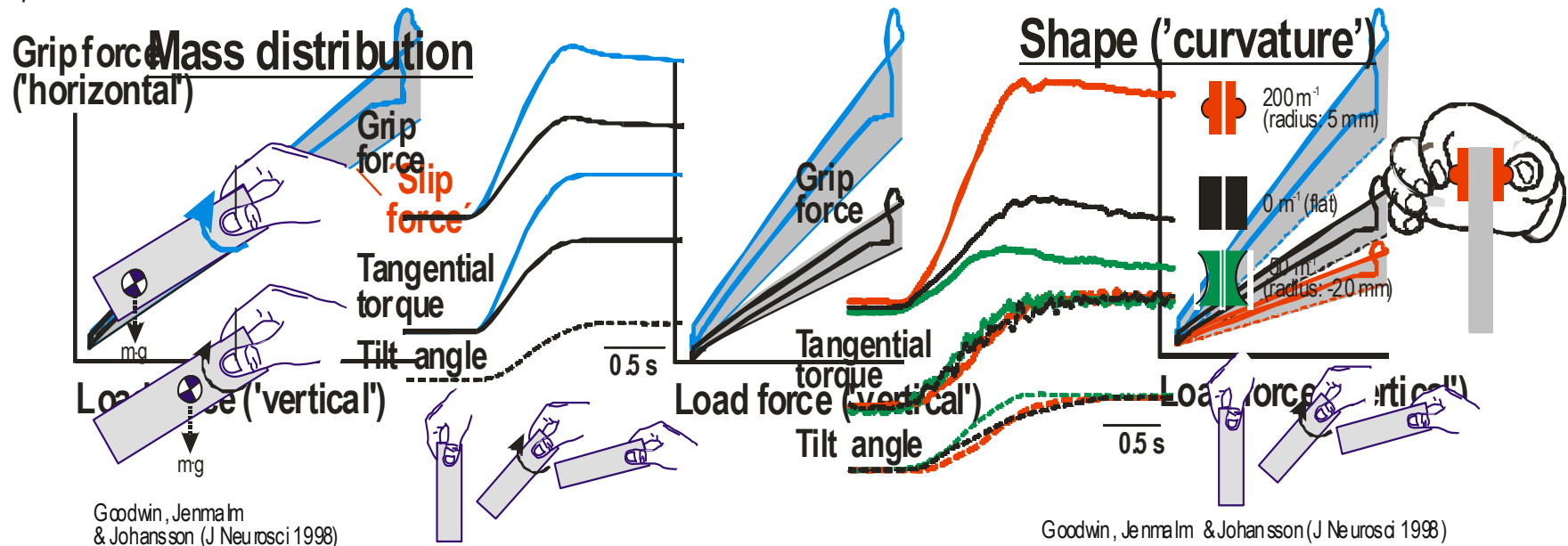
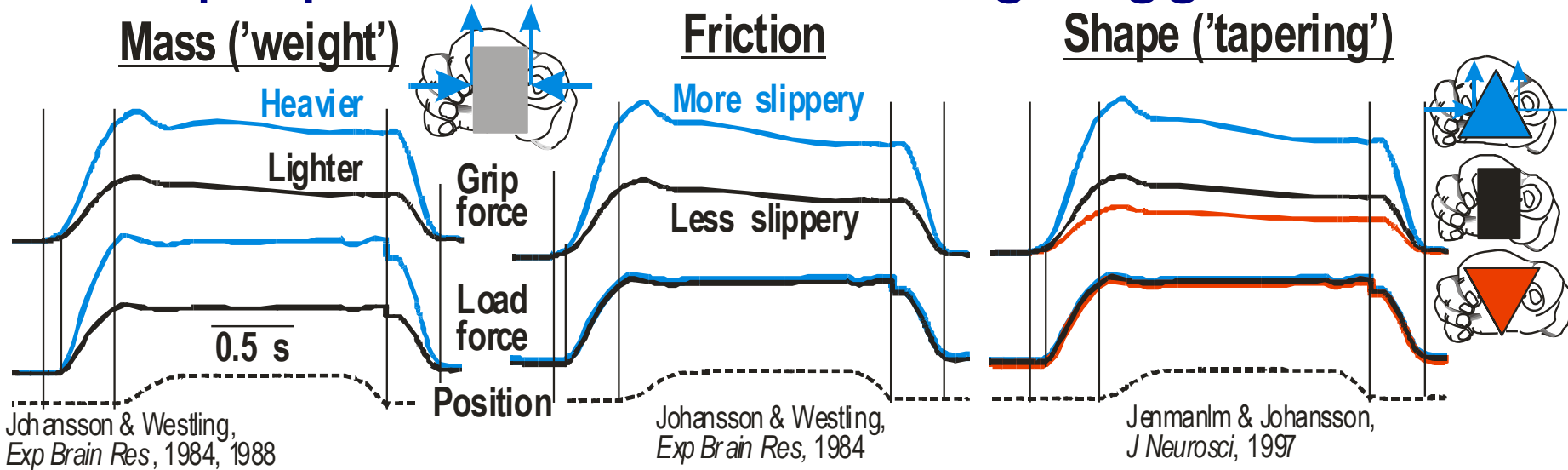
Adattamento parametrico delle fasi di azione alle proprietà meccaniche degli oggetti:

- Massa
- Attrito
- Forma
- Distribuzione della massa
- Curvatura

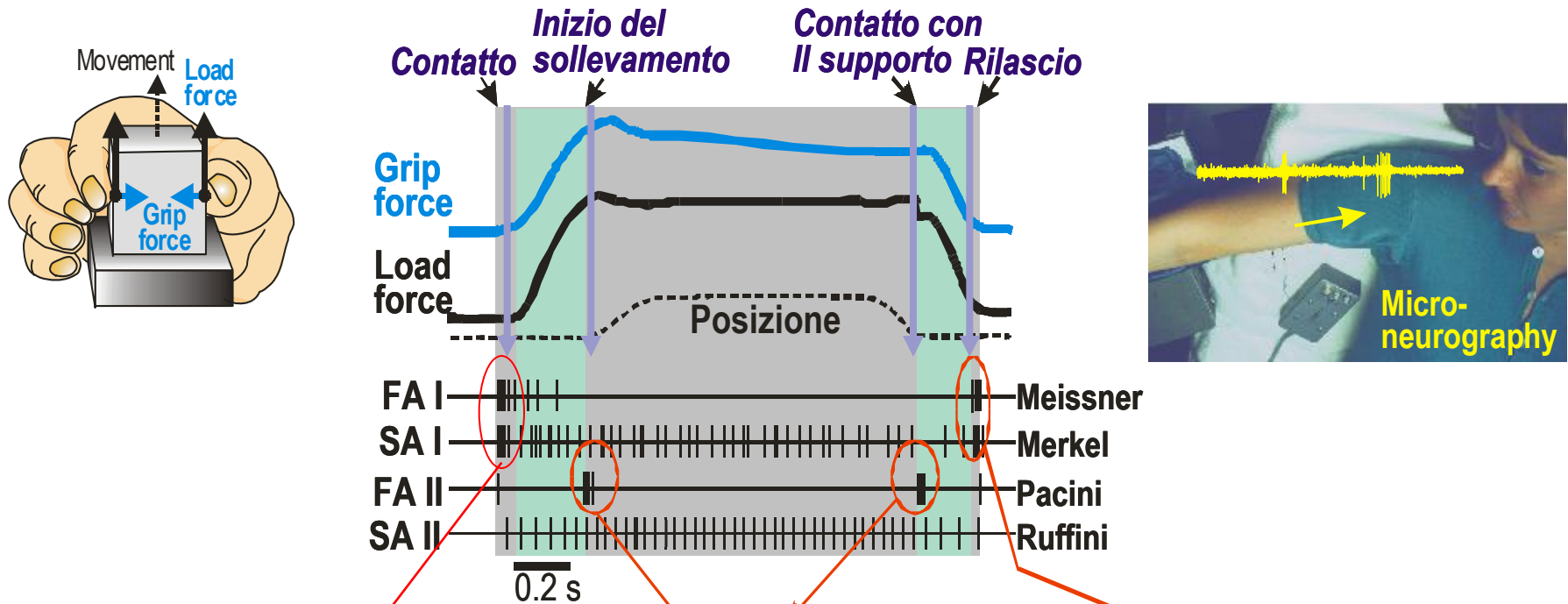




# Adattamento parametrico delle fasi di azione alle proprietà meccaniche degli oggetti



# Risposta dei recettori tattili in un compito prototipale di sollevamento di un oggetto



## Risposta al contatto

- **Tempo** del contatto
- **Posizione** del contatto sul polpastrello
- **Vettore di forza** sul polpastrello

## Transitori meccanici

- **Inizio e fine del contatto** tra l'oggetto afferrato e altri oggetti

## Risposta al rilascio

- **Fine del contatto** tra il dito e l'oggetto

‘**Punti di controllo tattile**’ per lo svolgimento del compito

# Il polpastrello come organo sensoriale

Popolazioni di afferenti tattili codificano:

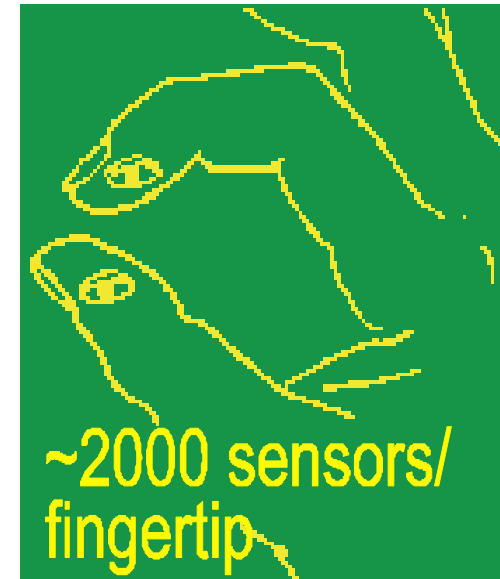
- Forza sul polpastrello:

- ☐ intensità
- ☐ direzione
- ☐ distribuzione spaziale

- Forma locale del contatto (curvatura della superficie dell'oggetto)

- Eventi di controllo tattile:

- ☐ scivolamenti
- ☐ inizio e fine del contatto
- ☐ inizio e fine del contatto dell'oggetto afferrato con altri oggetti (es. piano di appoggio)



Flat



Curved  
( $r = 10 \text{ mm}$ )



Curved  
( $r = 5 \text{ mm}$ )

# Sintesi delle caratteristiche del senso del tatto

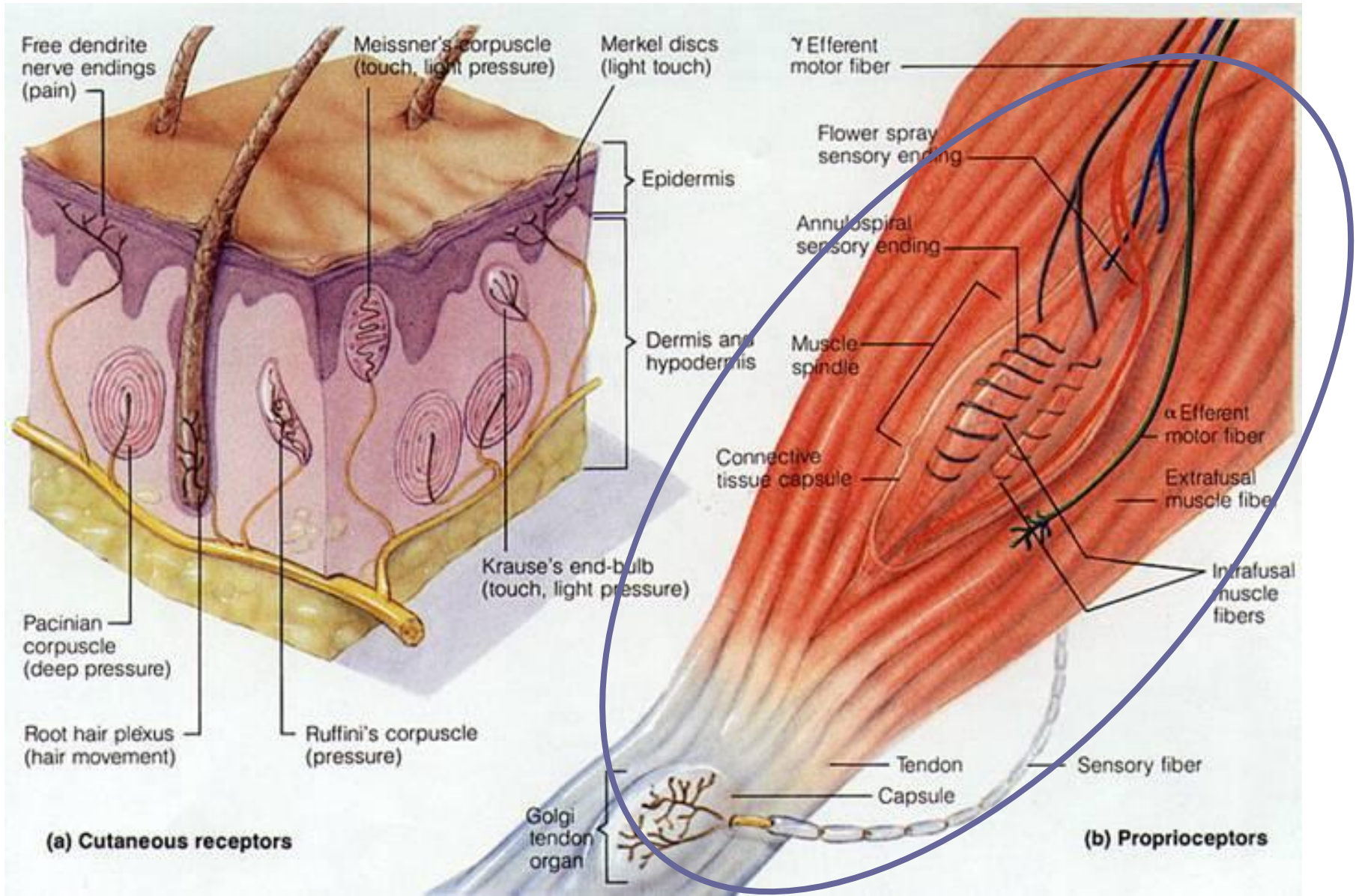
AFFERENTE TATTILE	CLASSE	DIMENSIONI	CAMPO RECETTIVO (diametro)	SOGLIA DI RISPOSTA* (pressione)	FREQUENZA	FUNZIONE	RUOLO NEL CONTROLLO DELLA PRESA (POLPASTRELLO)
<b>MEISSNER</b>	FA-I	80x30 $\mu\text{m}$	9,4 mm <sup>2</sup> (3,4 mm)	0,58 mN (10,2 mN/mm <sup>2</sup> )	8-64 Hz	BORDI SOTTILI, BEN DEFINITI, VARIAZIONE E VELOCITA' DI VARIAZIONE DELLA PRESSIONE	CONTATTO, FORME LOCALI, FORZE SUL POLPASTRELLO
<b>MERKEL</b>	SA-I	10-15 $\mu\text{m}$ (diametro)	11 mm <sup>2</sup> (3,7 mm)	1,3 mN (22,8 mN/mm <sup>2</sup> )	2-32 Hz	BORDI SOTTILI, BEN DEFINITI, INTENSITA' DELLA PRESSIONE	CONTATTO, FORZE SUL POLPASTRELLO
<b>RUFFINI</b>	SA-II		58,9 mm <sup>2</sup> (8,7 mm)	7,5 mN (131,6 mN/mm <sup>2</sup> )	< 8 Hz	BORDI AMPI, NON BEN DEFINITI, INTENSITA' DELLA PRESSIONE	STIRAMENTI LATERALI DELLA PELLE, FORZE SUL POLPASTRELLO
<b>PACINI</b>	FA-II	1-4 mm x 0,5-1 mm	101,3 mm <sup>2</sup> (11,4 mm)	0,54 mN (9,5 mN/mm <sup>2</sup> )	64-400 Hz	BORDI AMPI, NON BEN DEFINITI, VIBRAZIONI	TRANSITORI MECCANICI
<b>POLPASTRELLO</b>						<ul style="list-style-type: none"> <li>■ <b>FORZA SUL POLPASTRELLO:</b> INTENSITA' E DIREZIONE</li> <li>■ <b>FORMA LOCALE DEL CONTATTO</b> (CURVATURA DELLA SUPERFICIE DELL'OGGETTO)</li> <li>■ <b>EVENTI DI CONTROLLO TATTILE:</b> SCIVOLAMENTI, INIZIO E FINE DEL CONTATTO, INIZIO E FINE DEL CONTATTO DELL'OGGETTO CON L'AMBIENTE</li> </ul>	

Il 90% dei recettori di tipo SA-I e FA-I risponde a uno stimolo di 5 mN\*, o di 87mN/mm<sup>2</sup>

\*forza applicata con un Von Frey hair, del diametro di 0,27 mm



# Il sistema somatosensoriale umano



# Recettori propriocettivi

**Receptors which signal the position and movement of limbs:**

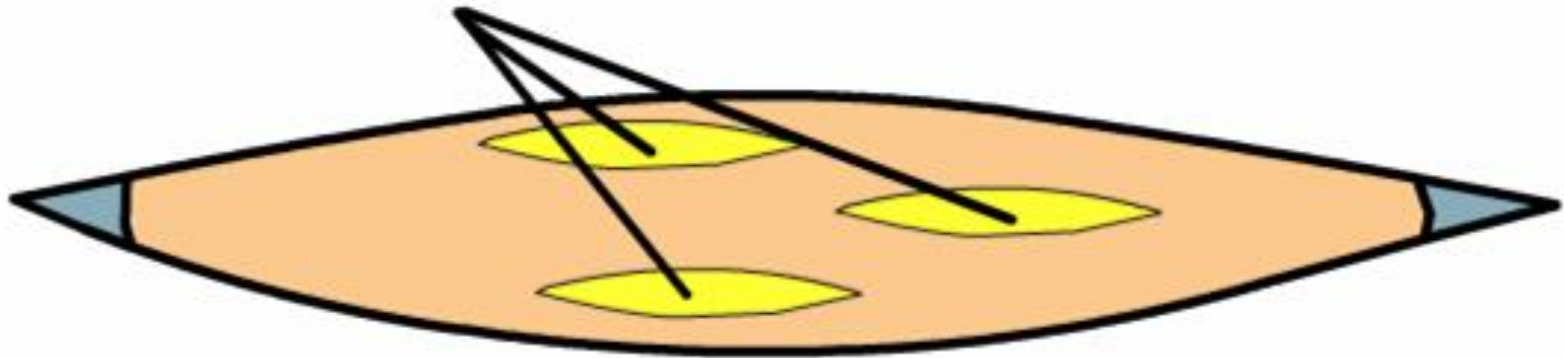
- i) **joint afferents** are located in the joints and are most sensitive to position at extreme joint angles
- ii) **muscle spindles** are located in the muscle and are very important afferent for position and movement (velocity)
- iii) **golgi tendon organ** are located in the muscle tendon and detect tension
- iv) **tactile receptors** in muscle and overlying skin

**What else might affect one's sense of position?**

When you command your hand to move you can estimate its position by the internal sense of effort. This signal is called **corollary discharge**.

# Fusi neuromuscolari

## Spindles



Muscle spindles are located in parallel with the regular muscle fibers.

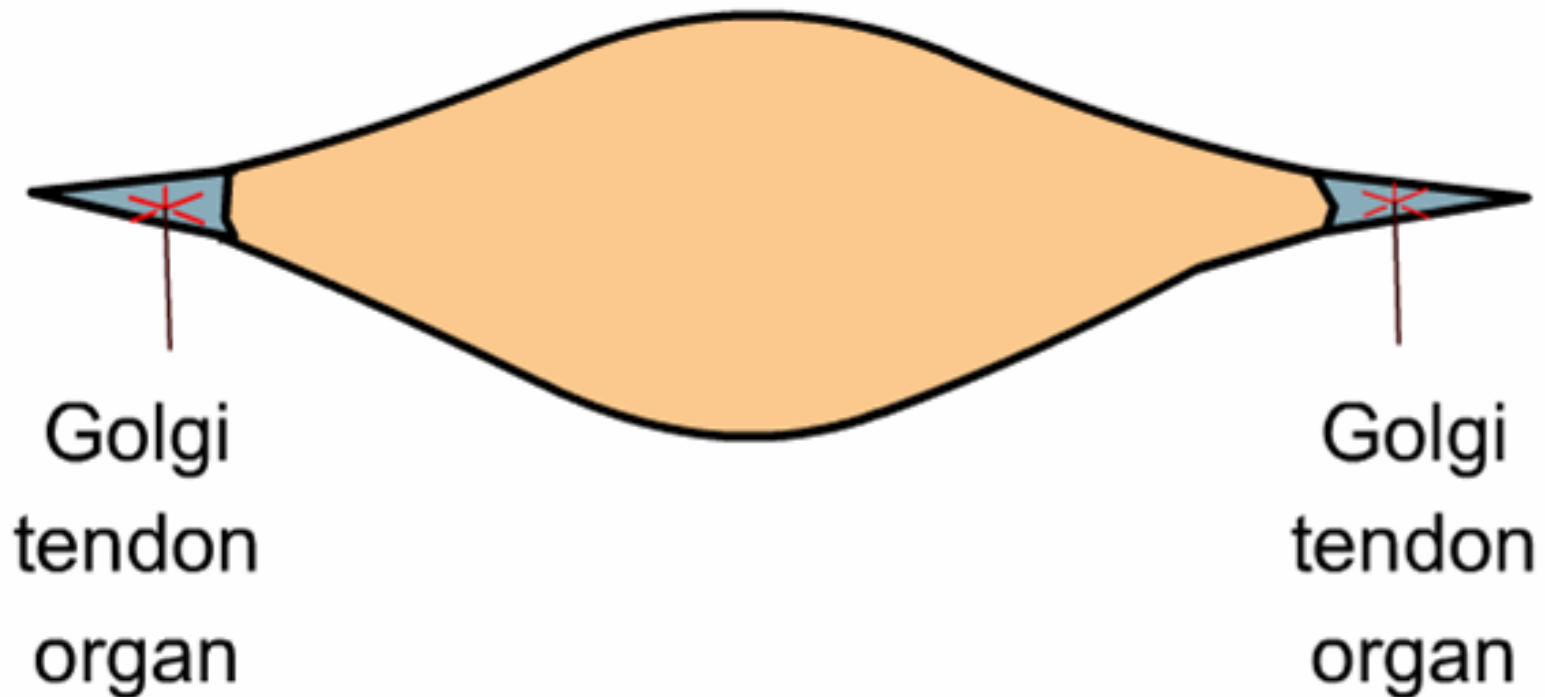
Here they undergo the same length changes as the rest of the muscle.

# Organi di Golgi

Golgi tendon organs (Ib) are located in the tendon of the muscle, in series with the muscle fibers.

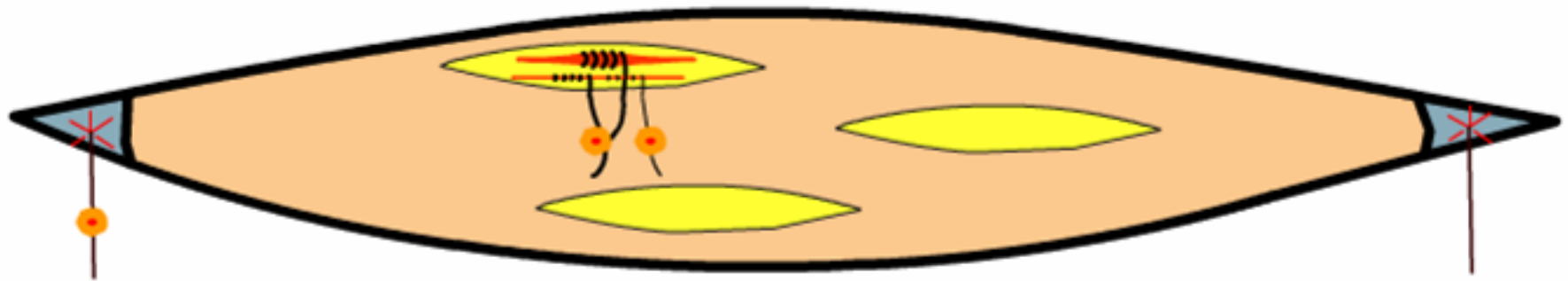
Here they become stretched when the muscle contracts.

Thus they sense the force the muscle exerts





## Comparing the response of spindles & Golgi tendon organs to passive stretch.

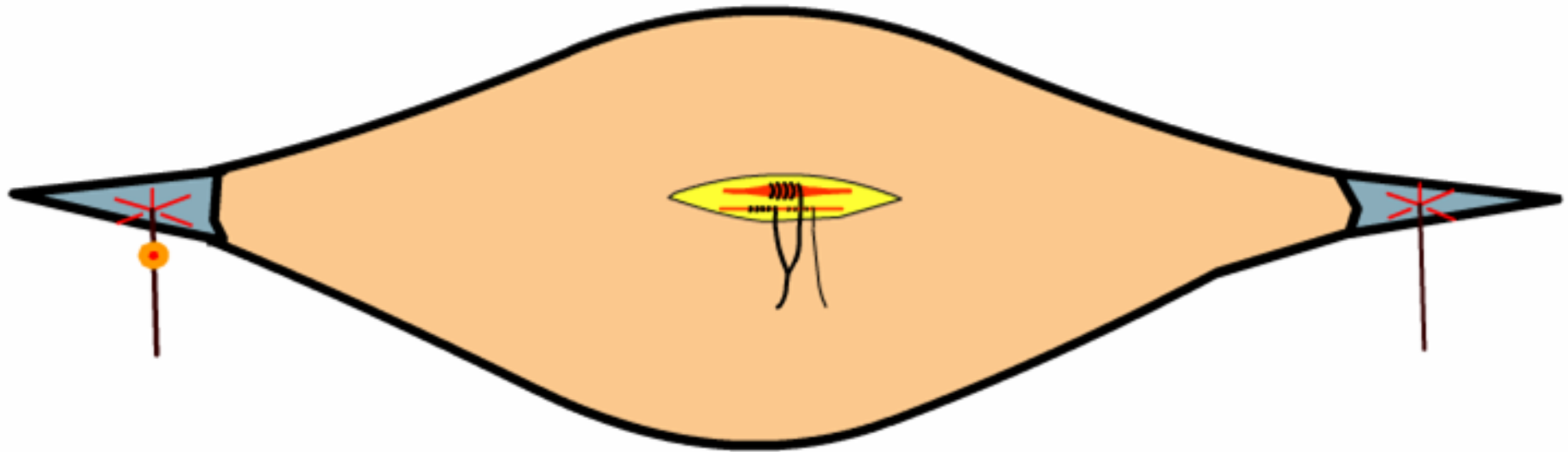


The thin II afferents come from chain fibers and are therefore sensitive to position.

Ia afferents come from both bag and chain fibers and are therefore sensitive to velocity (phasic response) as well as to position (tonic response).  
(They are also very sensitive to vibration.)

Ib afferents change little, primarily because the external force acting on the tendon during passive stretch is small.

## Comparing the response of spindles & Golgi tendon organs to active contraction.



Contraction causes the tendon to stretch and the spindles to shorten.

Spindles become silent.

Golgi tendon organs are very sensitive to active contraction.

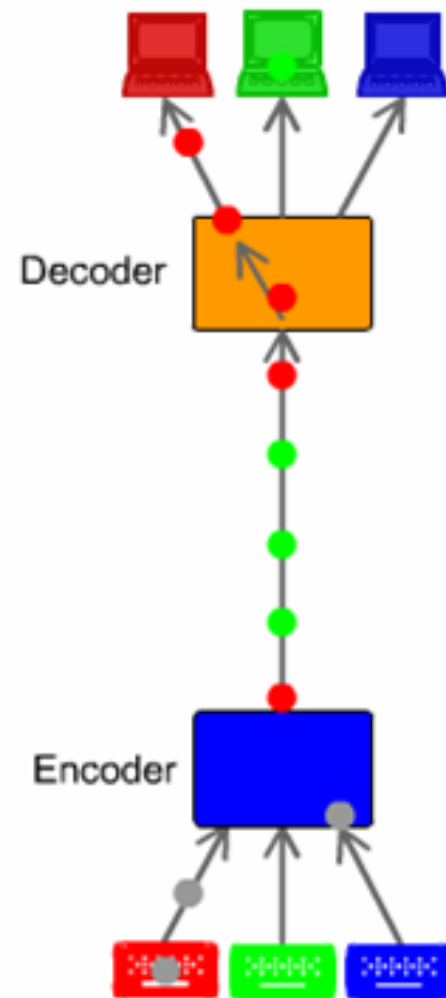
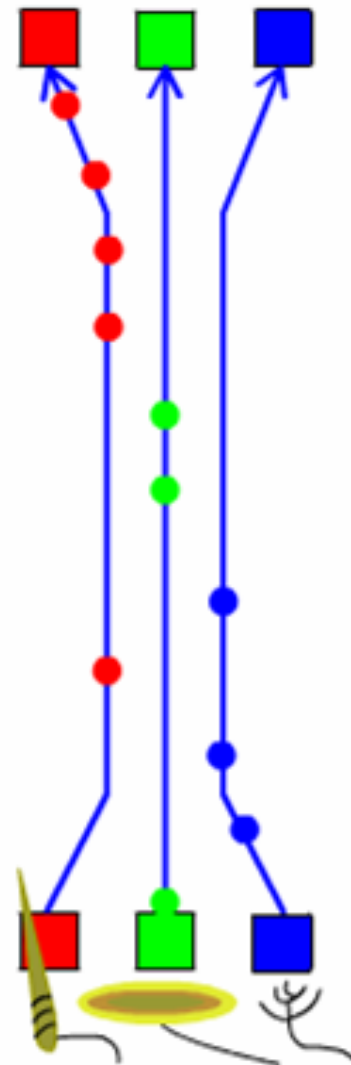
Note: Comparing the change in activity during passive and active contraction is a good technique for identifying the fibre type.

In the brain, the same response often signals  
very different sensations.

How do we know what the stimulus is?

**The sense of touch solves this  
same problem in a different way.**  
It gives each type of touch sensor its  
own private line.

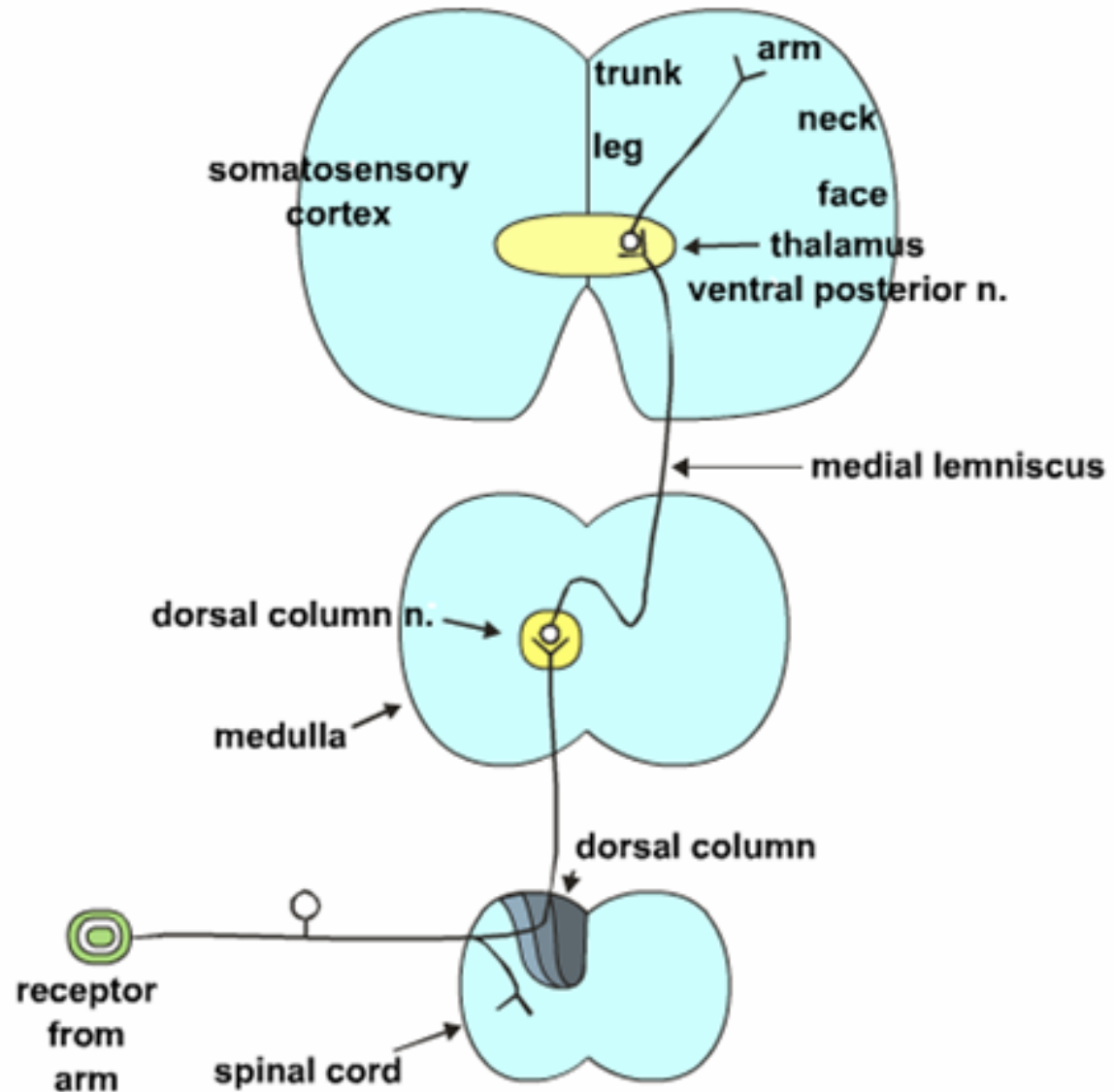
This is called its labeled line.  
Because of this, there is no reason  
for encoding and decoding  
each packet of information.  
But you do need lots of lines in your  
spinal cord.



## The pathway for transmission of pressure information from the finger to the primary sensory cortex.

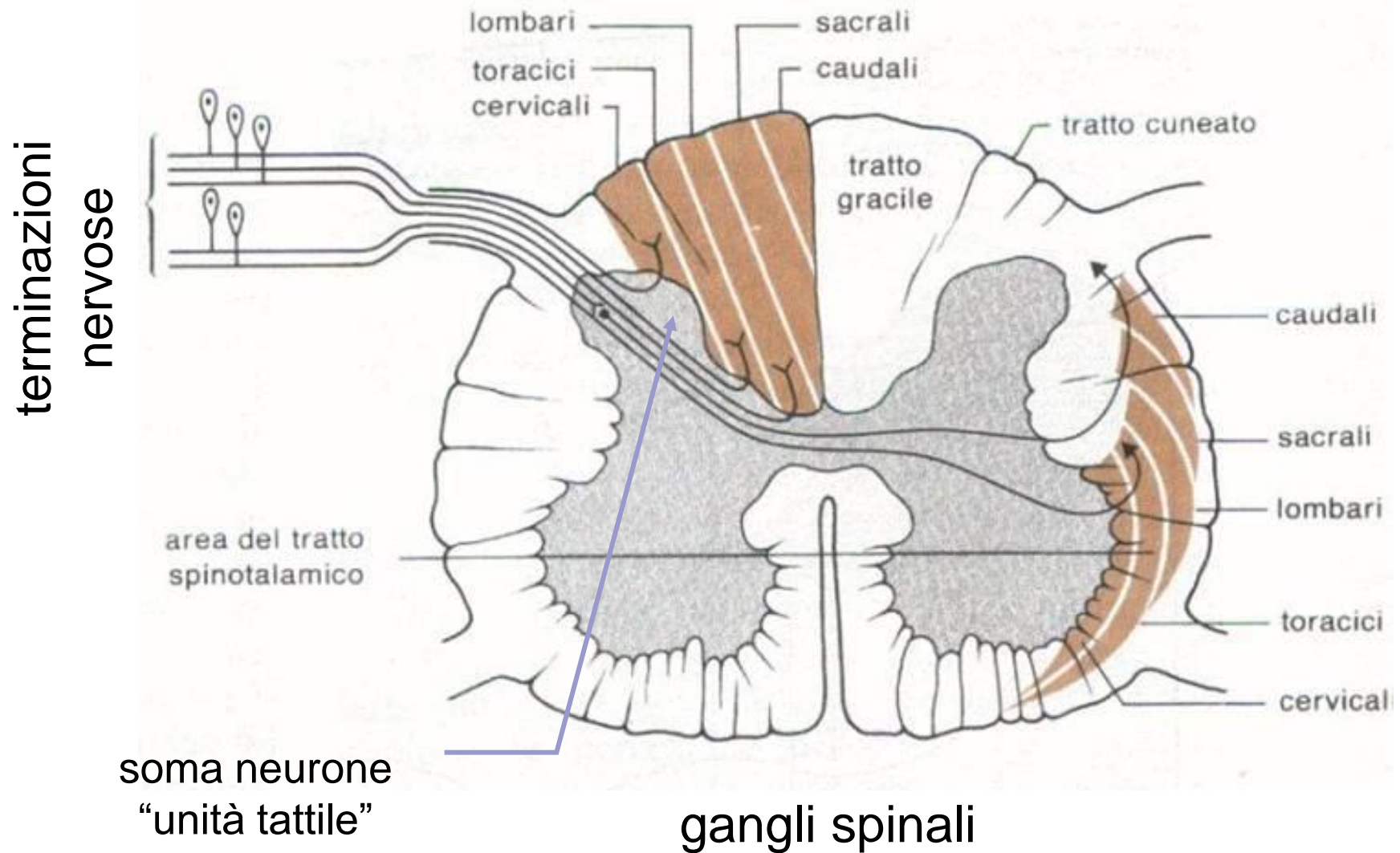
This is the dorsal column medial lemniscal system.

This is the path for the labeled line to the cortex ie the path from an RA afferent, deep in the skin (Pacinian) located on the arm to the first stage in the cortex.

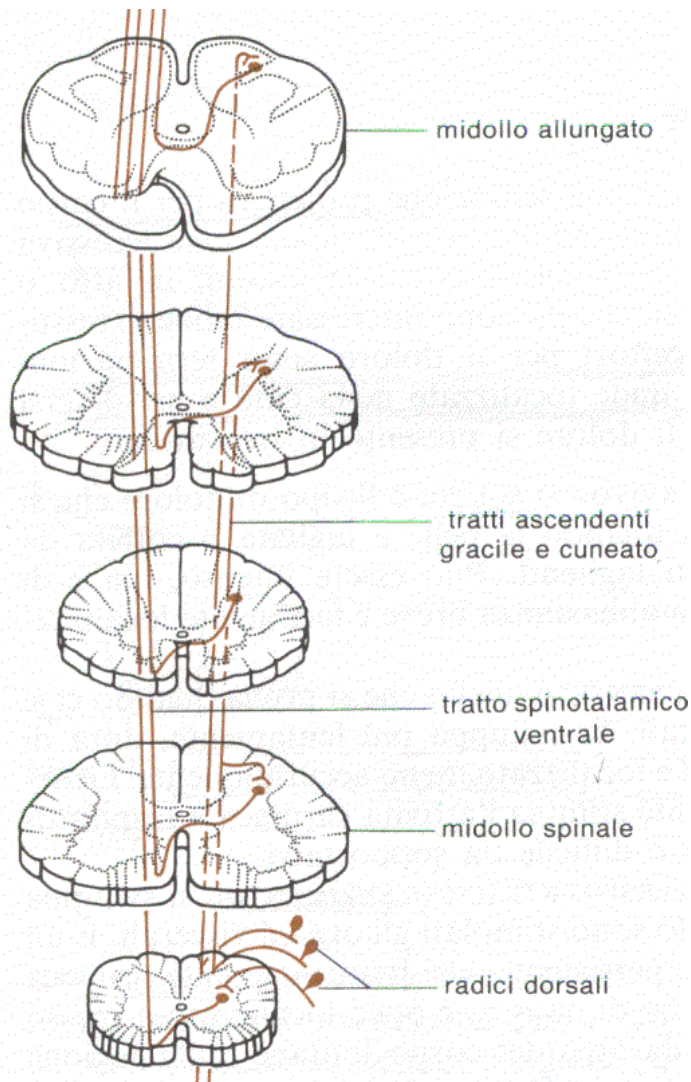




# Le vie afferenti somatiche



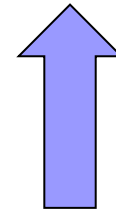
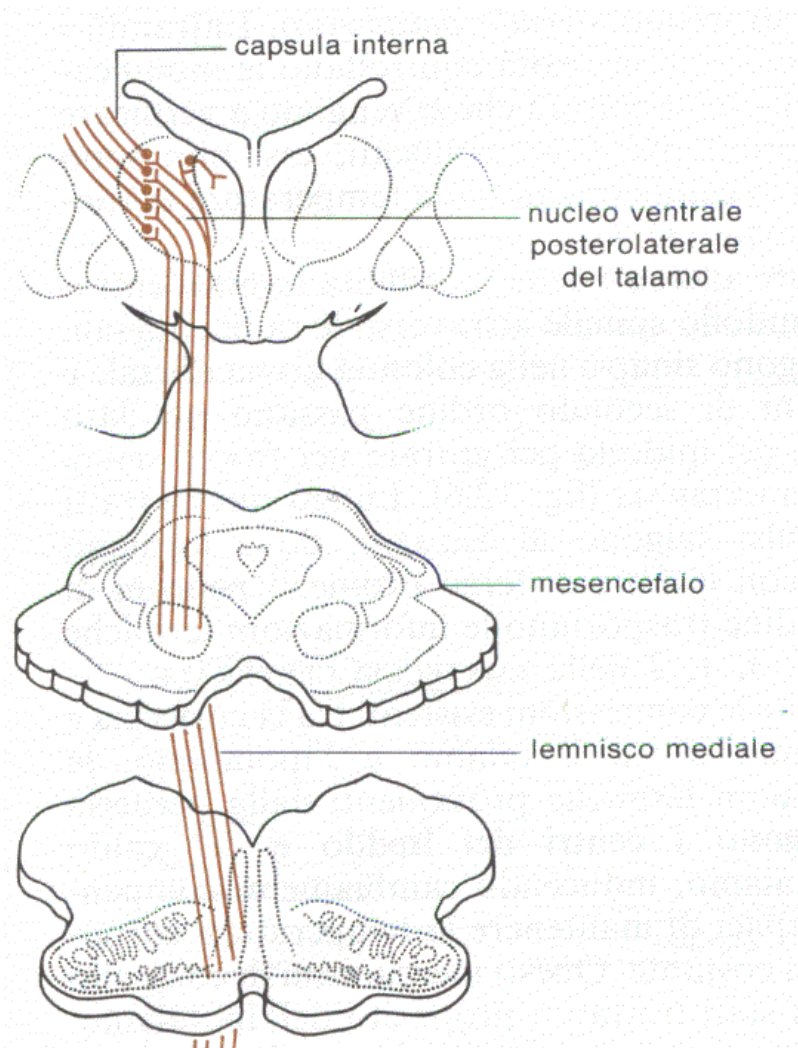
# Le vie afferenti somatiche



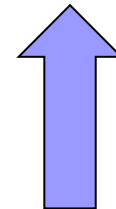
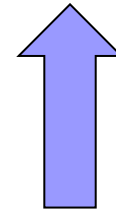
*Le informazioni  
viaggiano su vie parallele  
per mantenere  
spazialmente distinti gli  
stimoli percepiti sulla  
pelle*

dai gangli spinali

# Le vie afferenti somatiche



al talamo

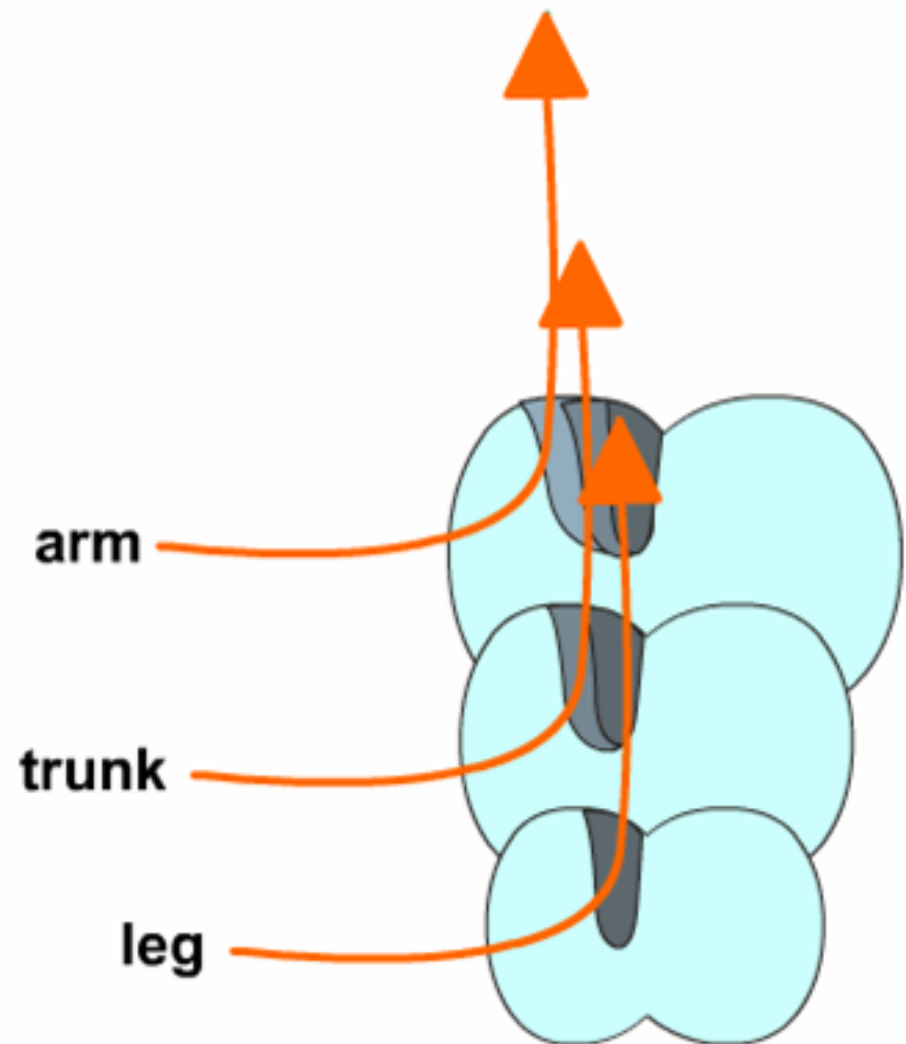


dal midollo allungato

## The pathway for transmission of pressure information from the finger to the primary sensory cortex.

In the spinal cord, the dorsal column has a somatotopic organization.

In the lower segments, only afferents from the leg are found. As one moves up the spinal cord new afferents enter laterally. Thus in high segments of the spinal cord one finds that leg afferents are medial, arm afferents lateral, and trunk afferents in the middle.



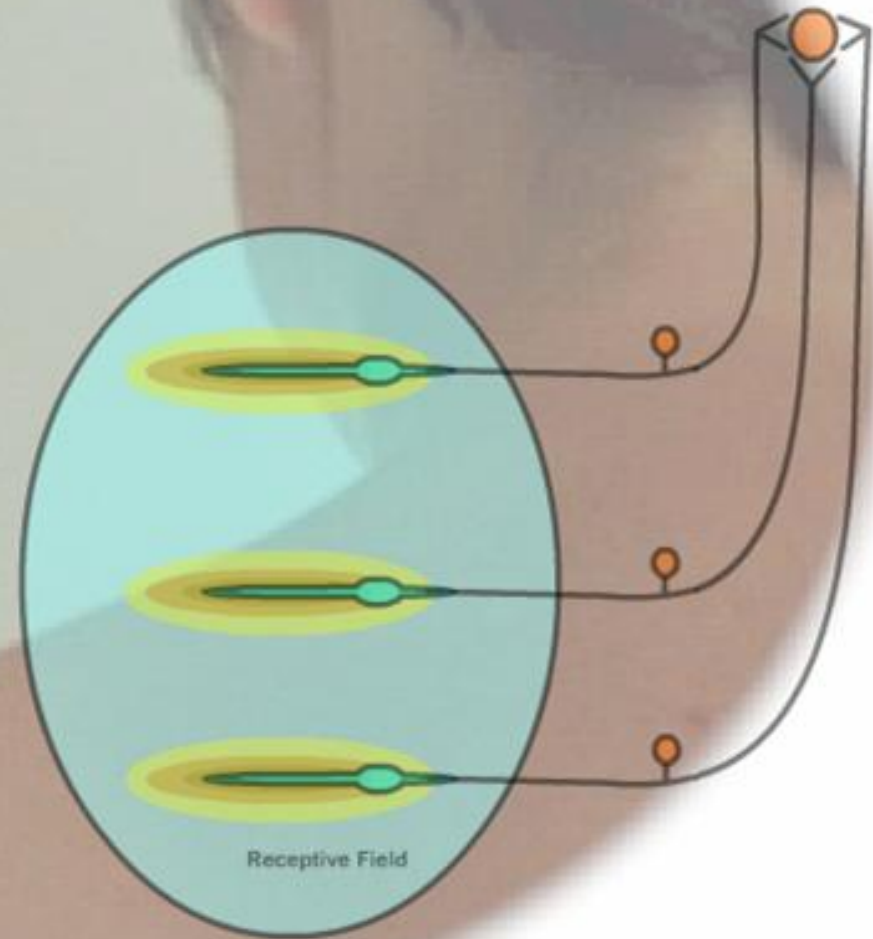


## Function 1 of the DCN: Convergence (DCN = Dorsal Column Nuclei)

The skin on your back has a low afferent density. Many afferents converge onto a single DCN neuron.

Thus only a few DCN neurons are required to represent a given area of skin.

The consequence is large receptive fields and a low tactile discrimination (like the peripheral retina).



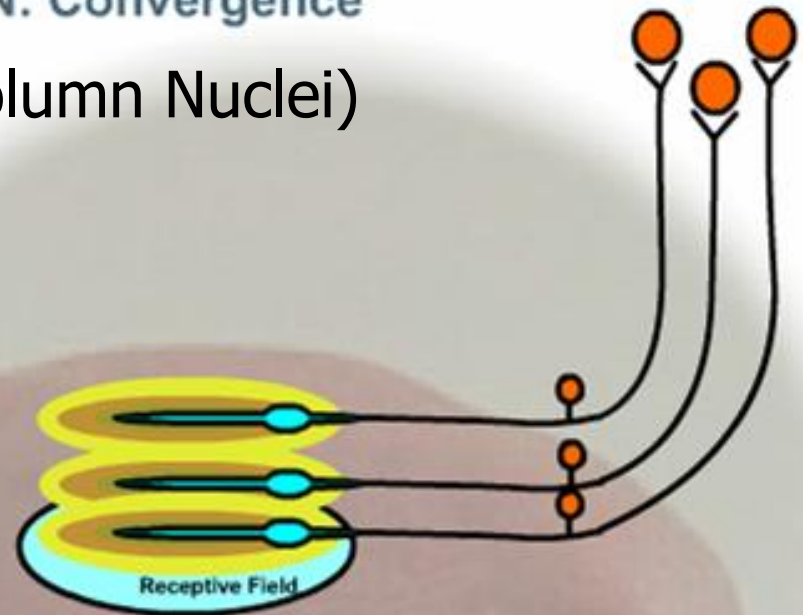
## Function 1 of the DCN: Convergence

(DCN = Dorsal Column Nuclei)

The skin on your finger tip has a high afferent density which have a low convergence in the DCN.

Thus many DCN neurons are required to represent a given area of skin.

The consequence is small receptive fields and a high tactile discrimination (like fovea).



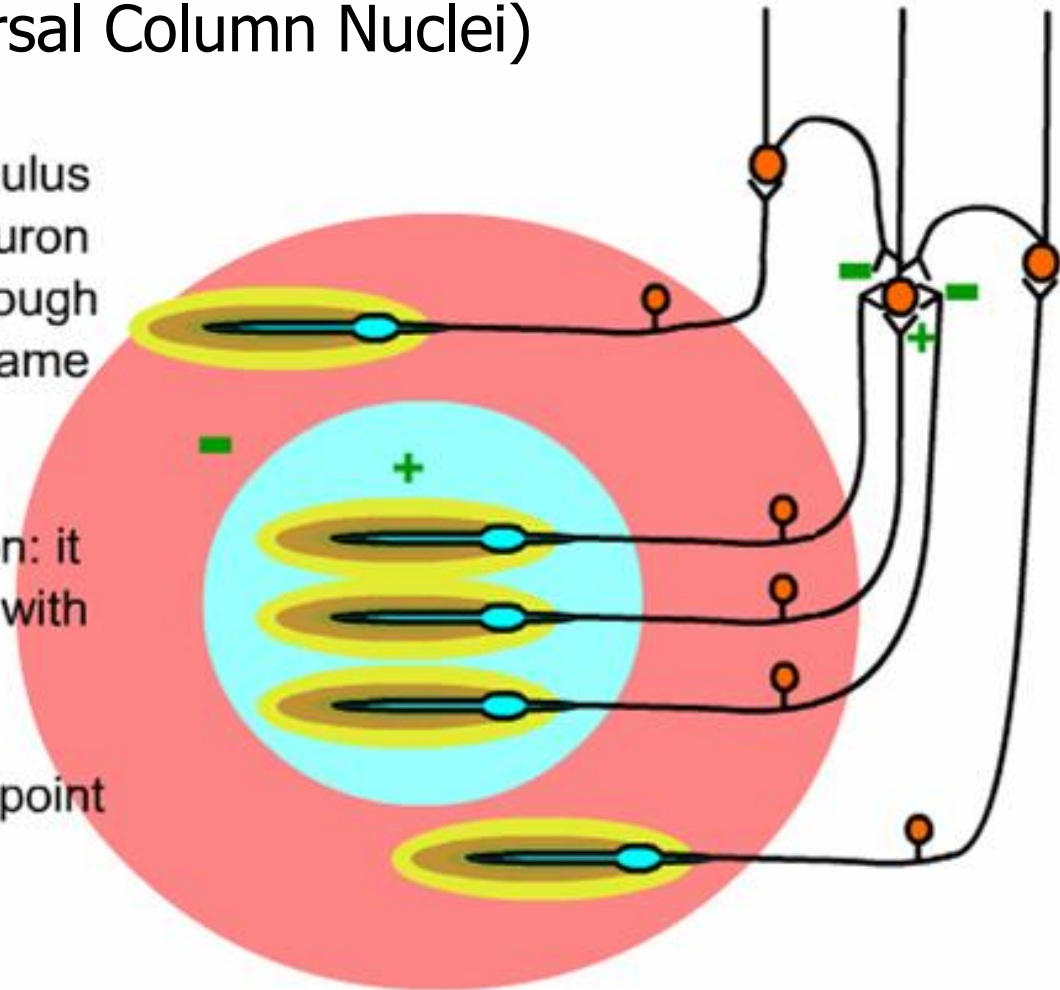
## Function 2 of the DCN: Inhibitory surround

(DCN = Dorsal Column Nuclei)

As with retinal ganglion cells, a stimulus in the center will activate a DCN neuron while a stimulus in the surround, through inhibitory feedback, will inhibit the same DCN neuron.

The function is the same as in vision: it accentuates the activity associated with the edge of an object.

In this manner it also enhances two-point discrimination.



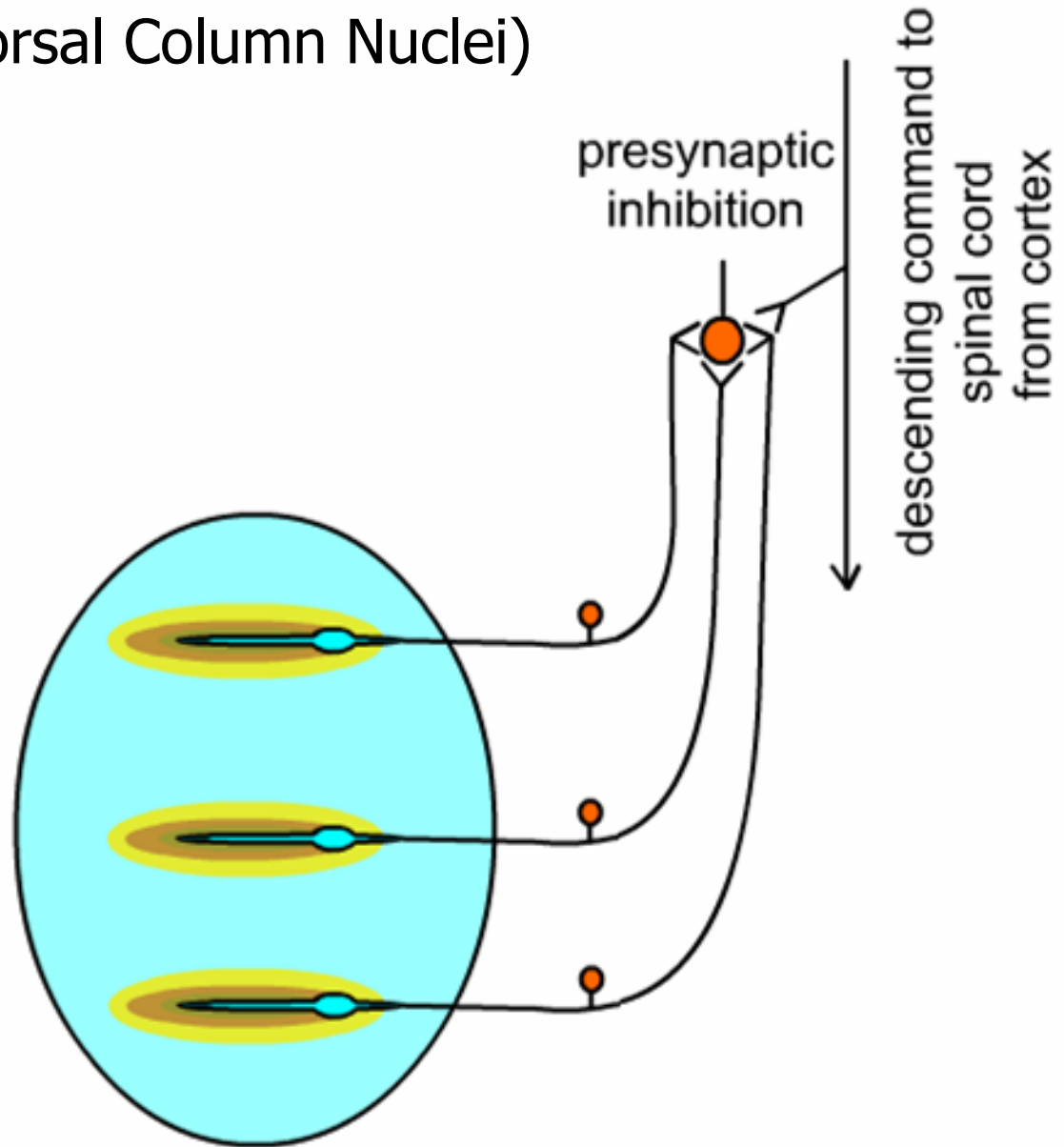
## Function 3 of the DCN: Cortical Gating (DCN = Dorsal Column Nuclei)

Presynaptic inhibition from the cortex can selectively turn off the stimulus coming from one afferent and thus allow you to focus in on the others.

Why presynaptic?

Post synaptic inhibition directly on the DCN neuron would turn off all three.

Only presynaptic inhibition is selective to one.





## The three major features of the organization of somato sensory cortex.

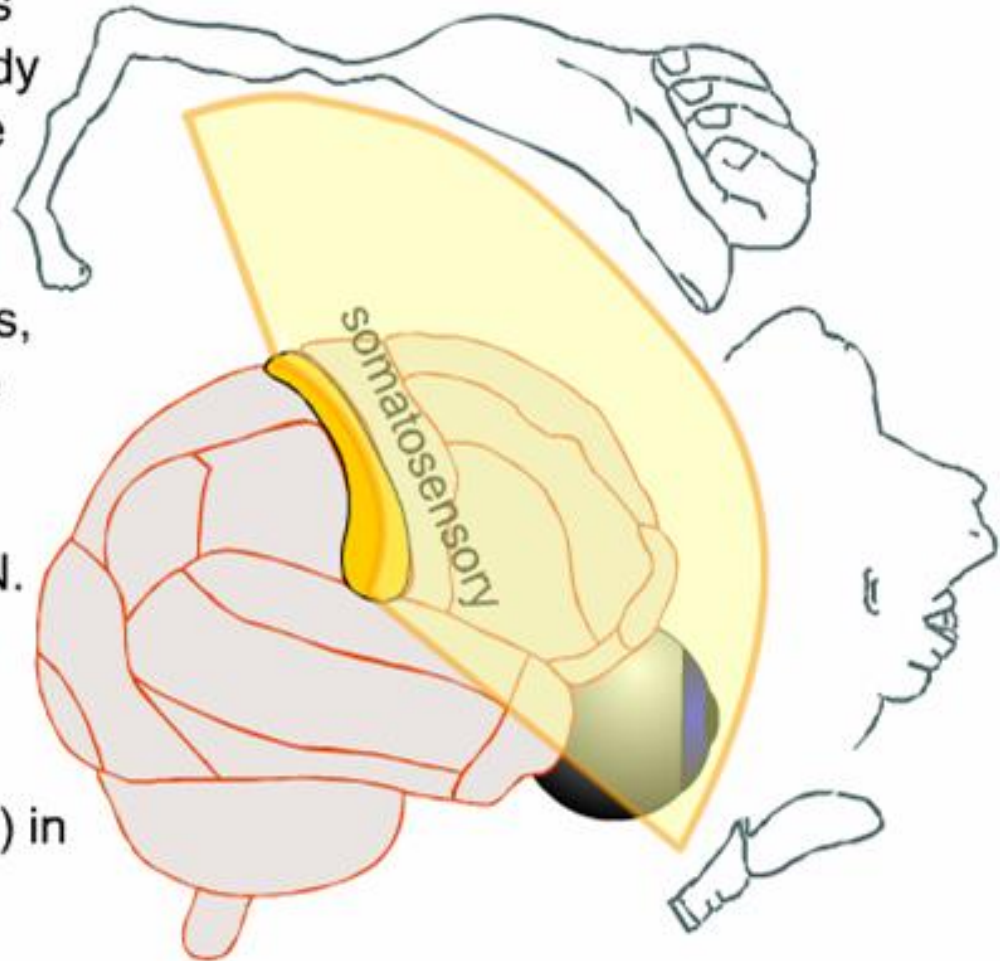
### Feature 1: Somatotopic organization.

Primary somatosensory cortex (S1) is somatotopically organized with the body surface laid down sequentially on the postcentral gyrus.

This body map is distorted with the lips, tongue and finger tips having a large representation.

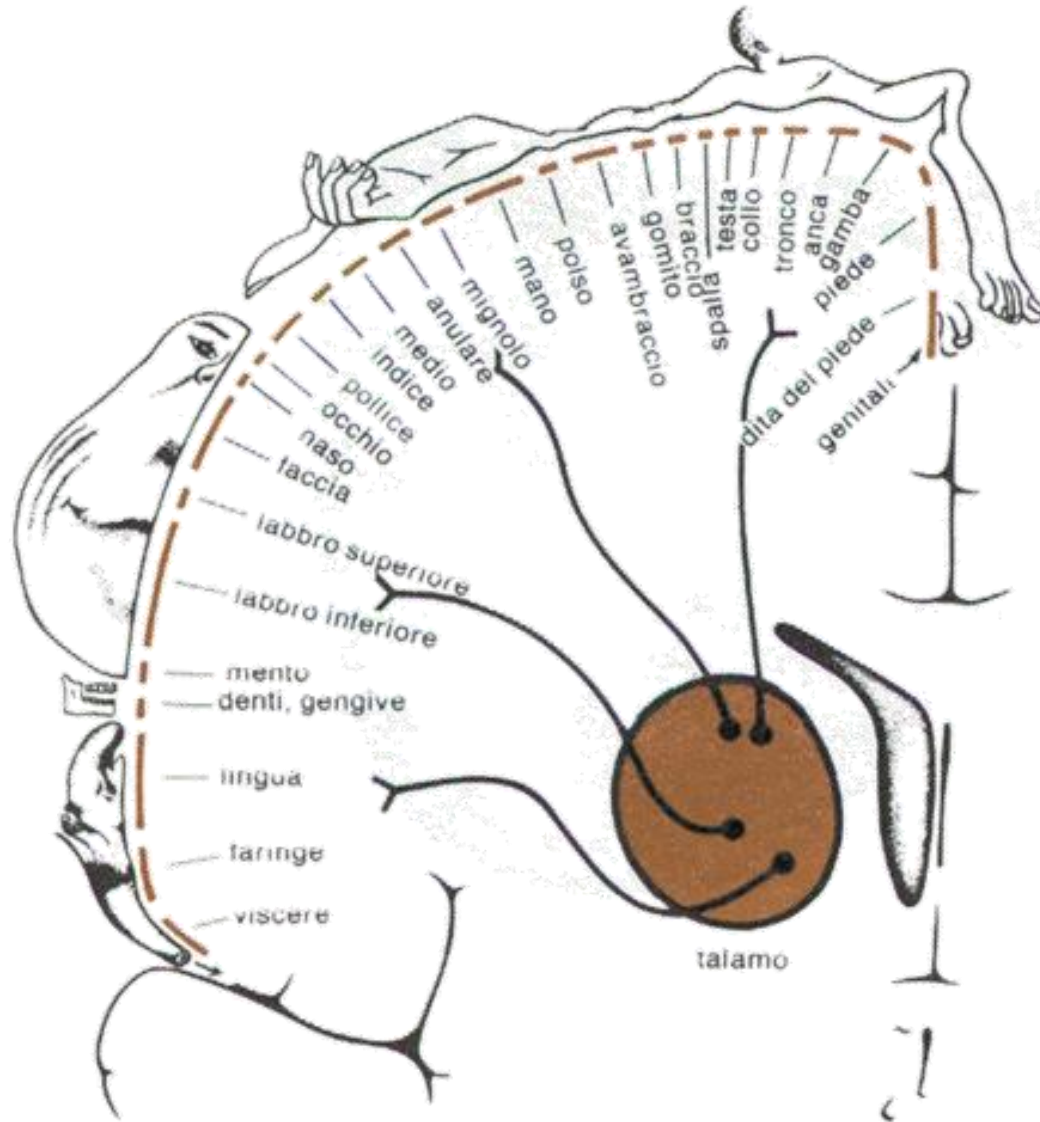
This distortion reflects that of the DCN.

The skin of the back has a small representation because of the high convergence (and large receptive fields) in DCN neurons.





# La corteccia somato-sensoriale



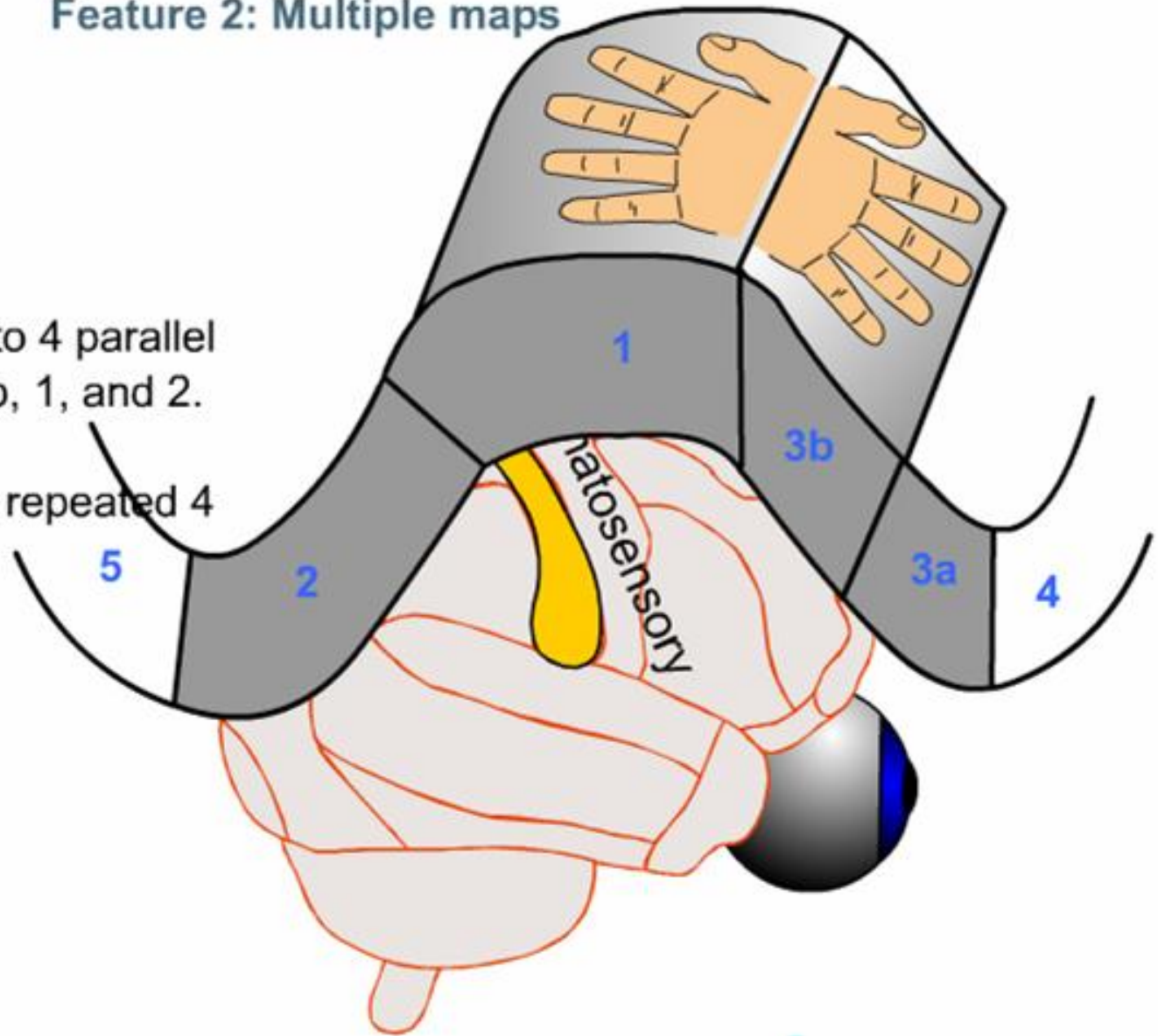
*Le fibre parallele di conduzione delle informazioni permettono di mantenere una rappresentazione completa e topograficamente organizzata degli stimoli percepiti sulla superficie corporea*

## The three major features of the organization of somato sensory cortex.

### Feature 2: Multiple maps

S1 is subdivided into 4 parallel strips: areas 3a, 3b, 1, and 2.

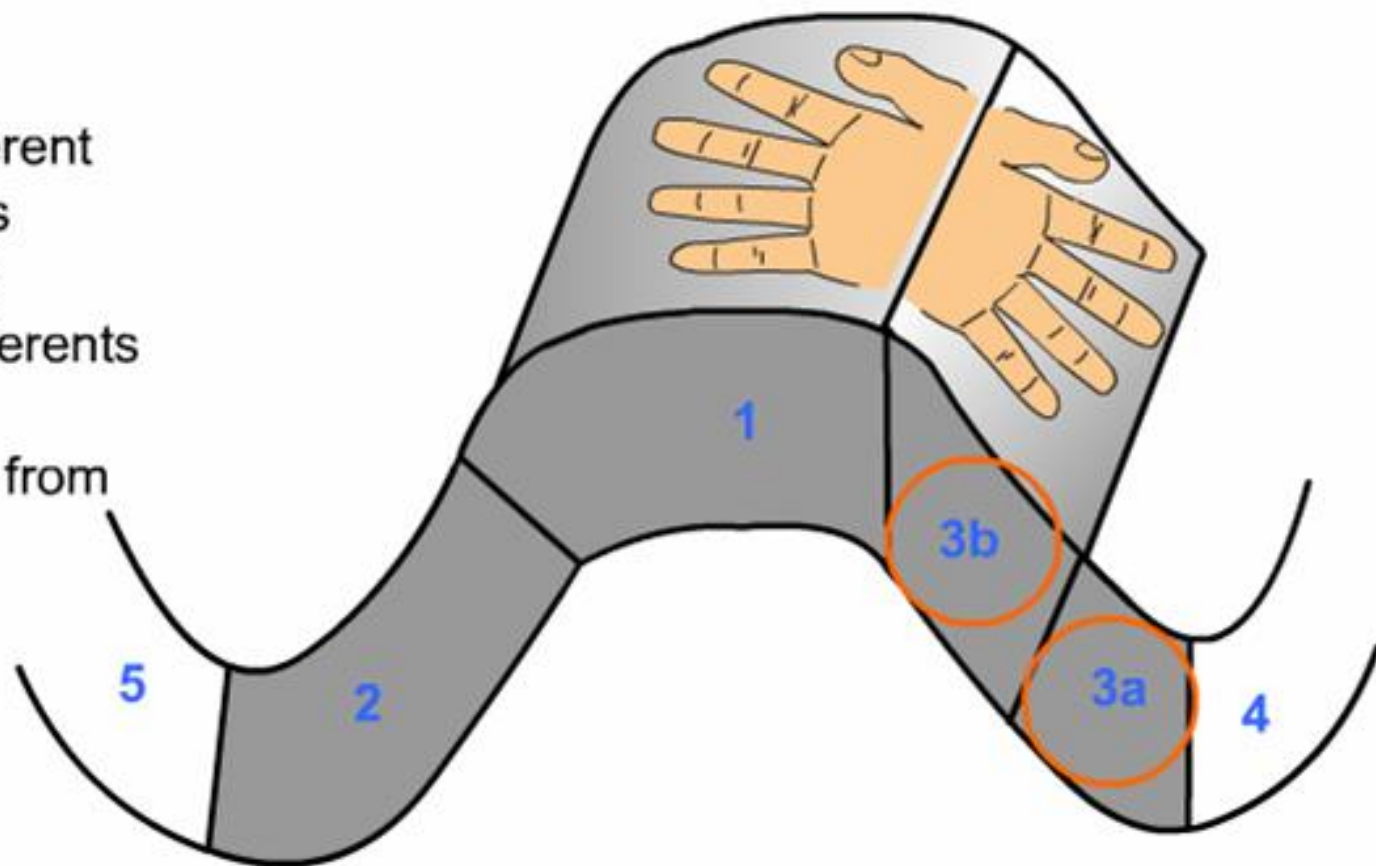
The homunculus is repeated 4 times.



# The three major features of the organization of somato sensory cortex.

## Feature 2: Multiple maps

In each area different  
receptor types  
predominate:  
area 3a: muscle afferents  
&  
area 3b: afferents from  
the skin.



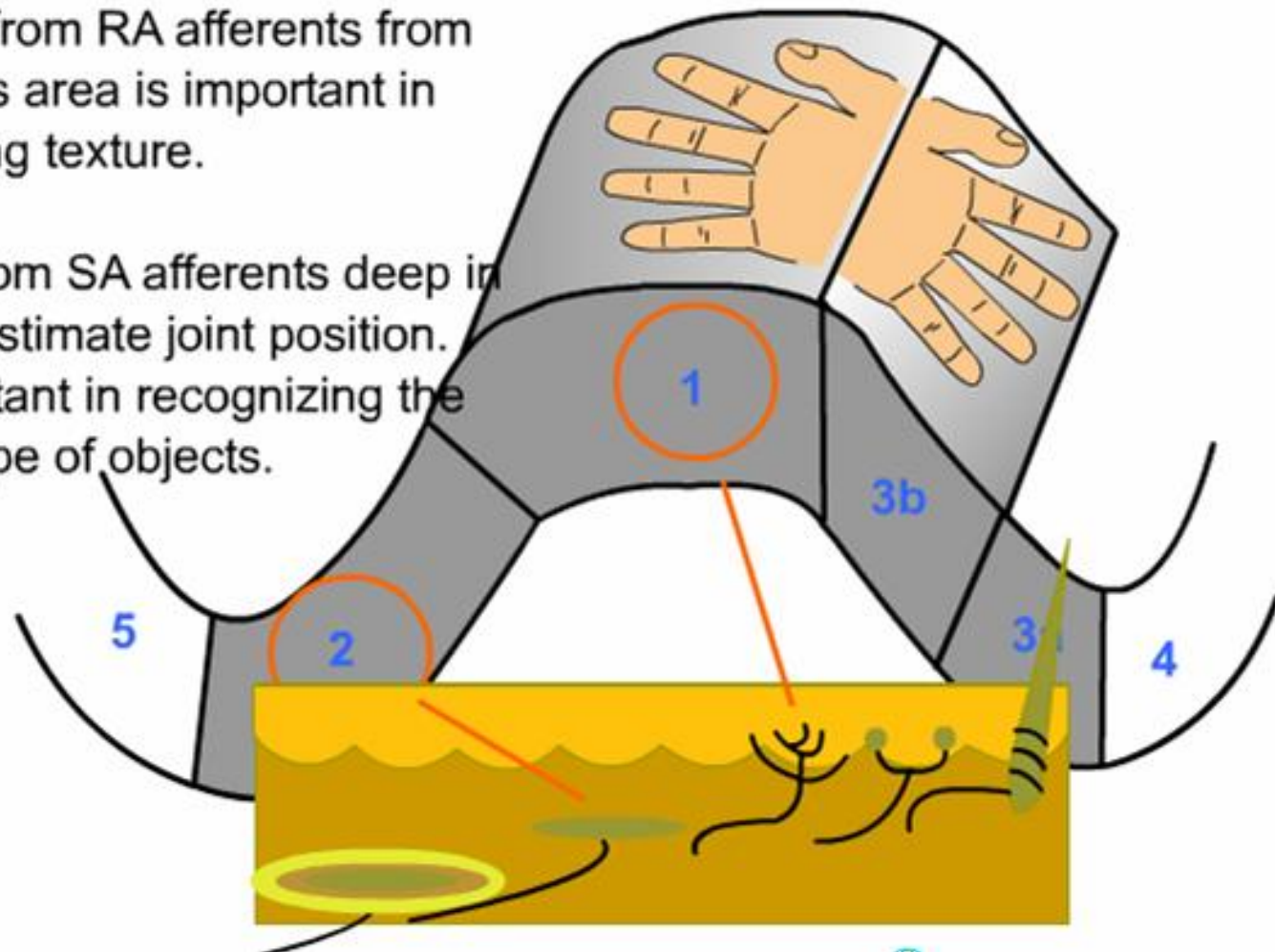
# The three major features of the organization of somato sensory cortex.

## Feature 2: Multiple maps

Each area extracts different features.

Area 1 receives input from RA afferents from the skin surface. This area is important in recognizing texture.

Area 2 receives input from SA afferents deep in skin and is used to estimate joint position. Joint position is important in recognizing the size and shape of objects.





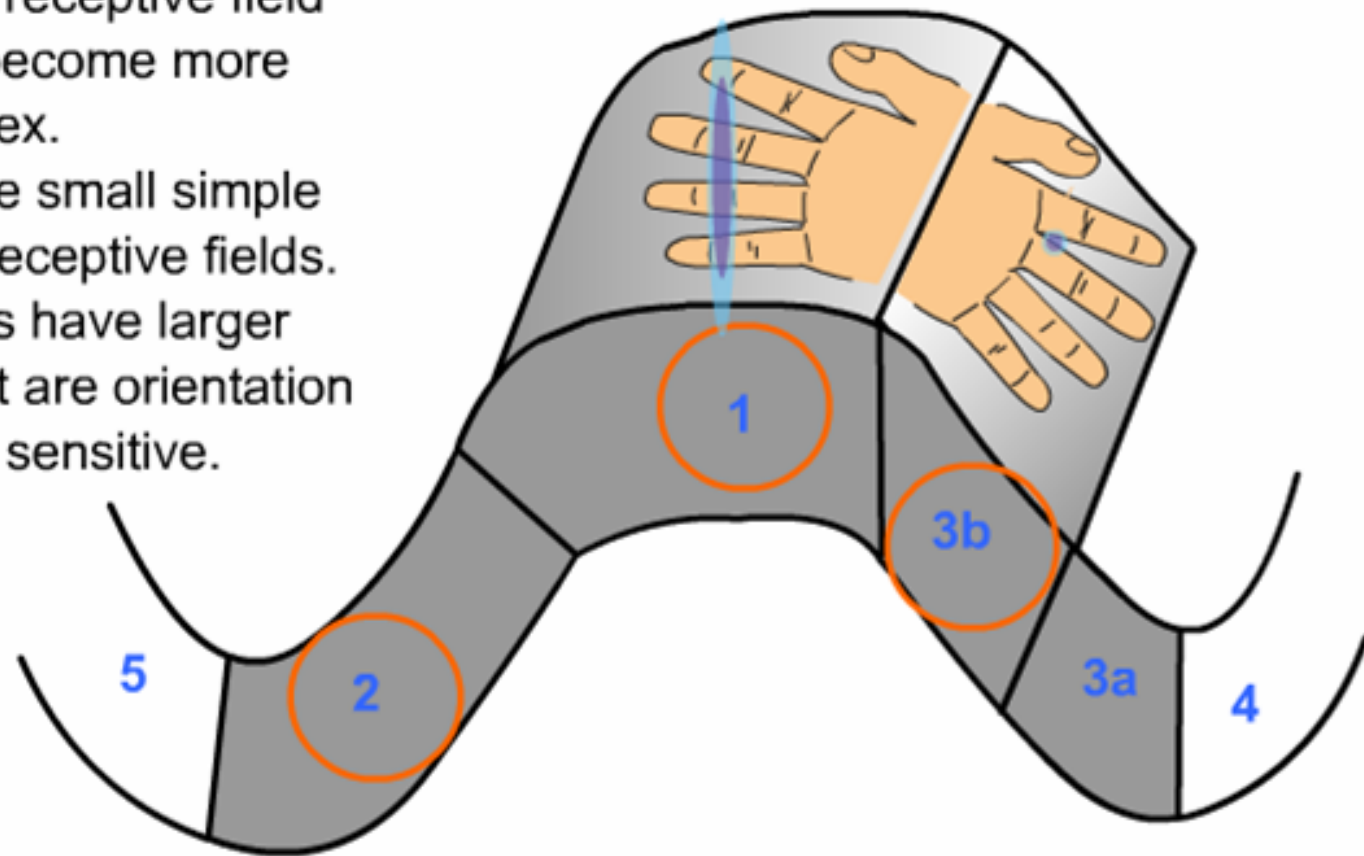
## The three major features of the organization of somato sensory cortex.

### Feature 2: Multiple maps

As one moves to more posterior regions, the cells' receptive field characteristics become more complex.

Area 3b cells have small simple circular surround receptive fields.

Areas 1 & 2 cells have larger receptive fields that are orientation and direction sensitive.

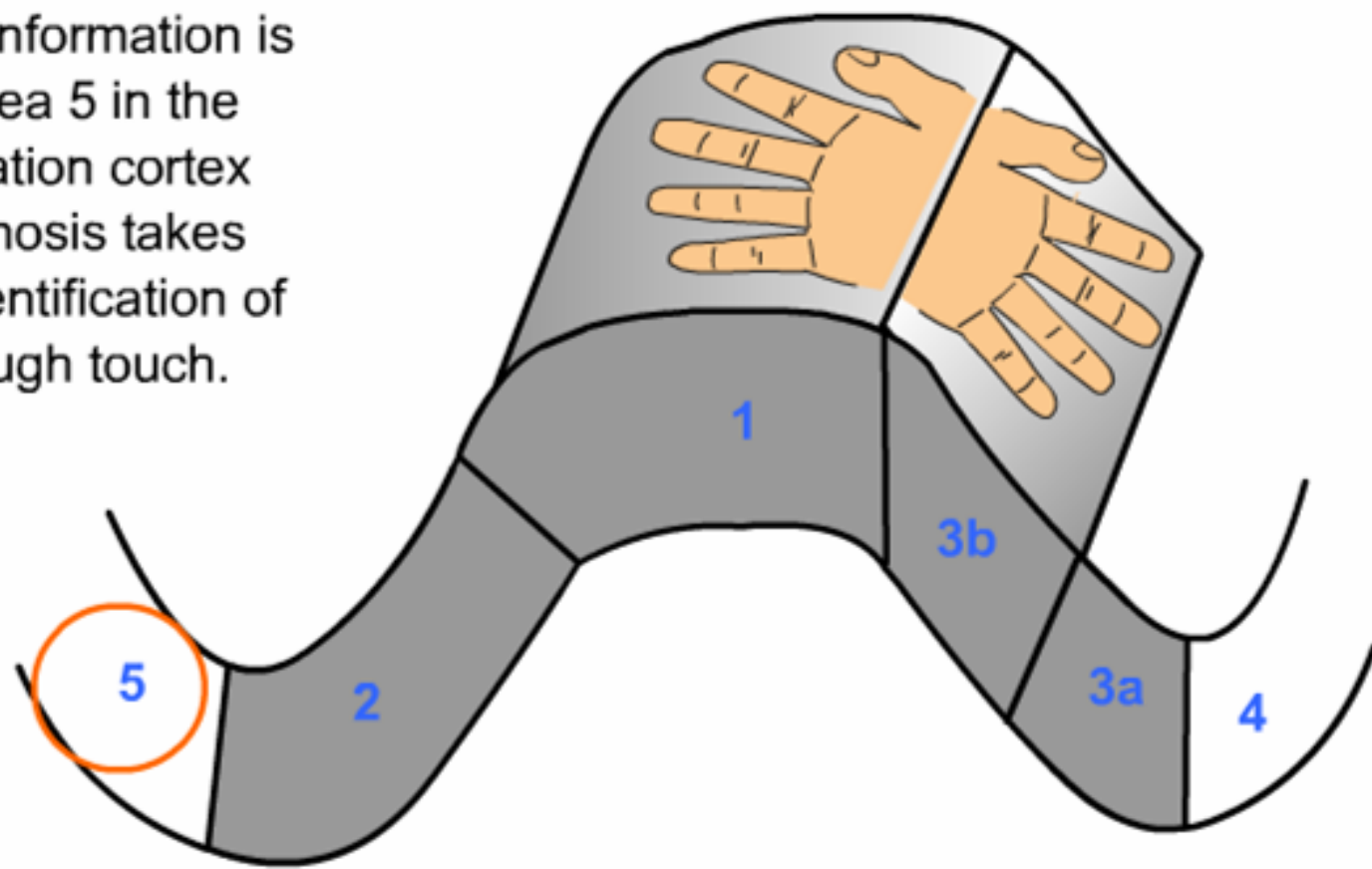




# The three major features of the organization of somato sensory cortex.

## Feature 2: Multiple maps

Somatosensory information is then sent to area 5 in the parietal association cortex where stereognosis takes place: the 3D identification of an object through touch.



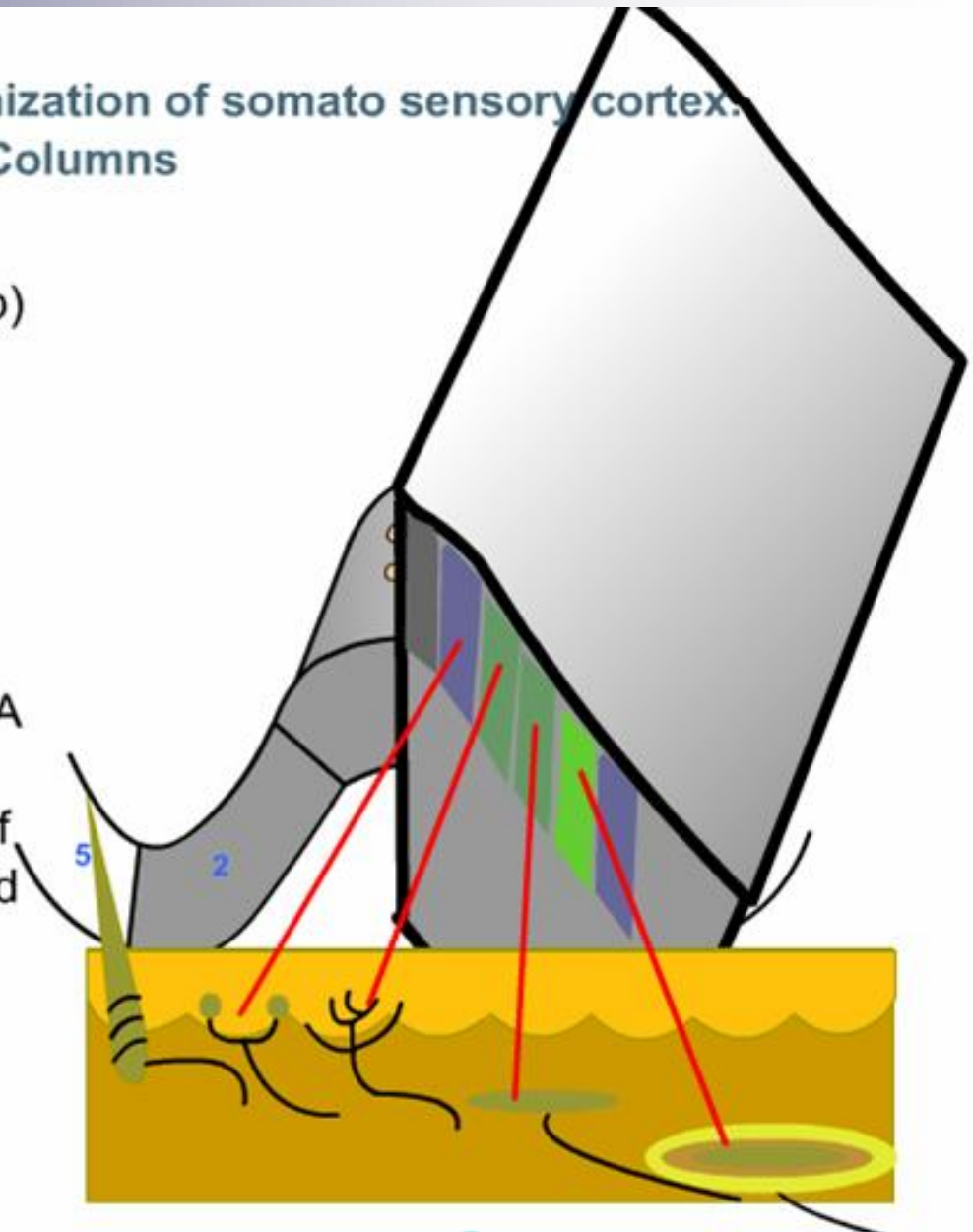
## The three major features of the organization of somato sensory cortex:

### Feature 3: Columns

If one looks at any one area (e.g. area 3b)  
one finds modality specific columns.

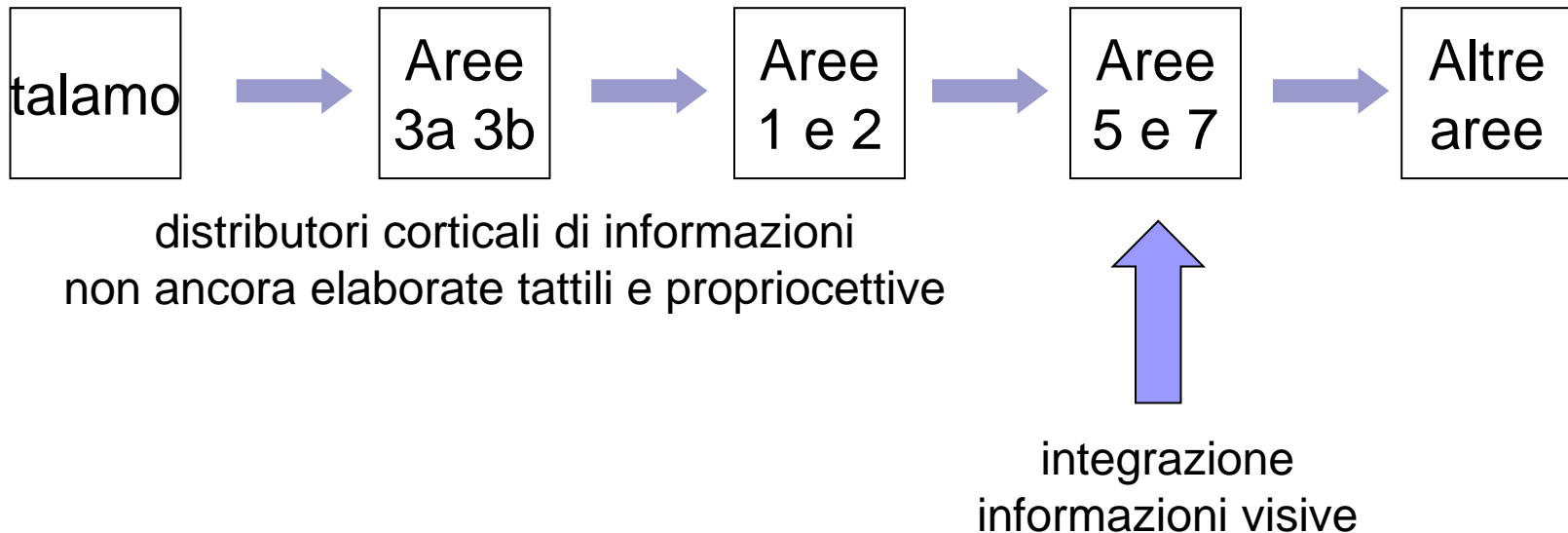
Each column receives input from one  
afferent type.

This separation of afferent types into  
columns is what produces labeled lines. A  
light vibration will excite the cells of one  
column type and not others. Activation of  
this column and not another is associated  
with a light vibration.



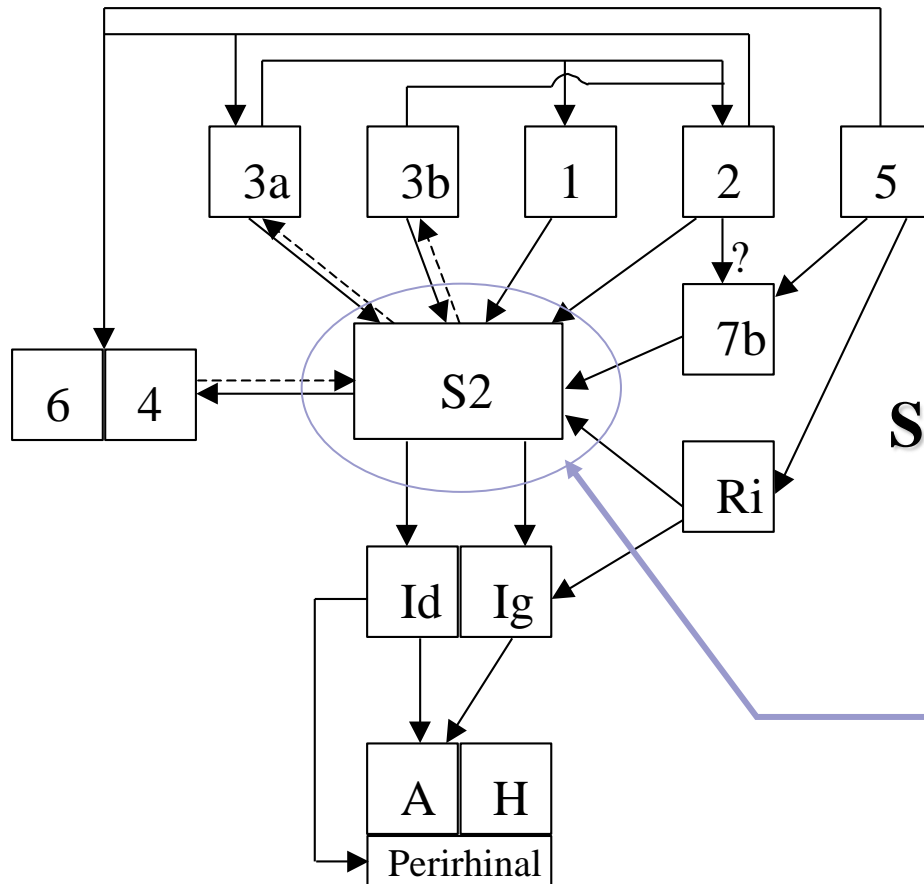
# Il modello gerarchico

Le informazioni trasmesse dal talamo alla corteccia vengono elaborate in serie lungo una sequenza di aree organizzate gerarchicamente mediante neuroni di proiezione cortico-corticale.



# Il modello gerarchico

IL MODELLO GERARCHICO: schema delle connessioni



Friedman  
1986

**SEM**  
**Simian Elaboration Model**

area  
integrativa

# Conclusioni

## ■ Il sistema tattile umano:

### □ a livello del recettore

- rileva pressioni e variazioni di pressione
- ha elevate prestazioni soprattutto in termini di risoluzione spaziale (2mm), sensibilità (87 mN/mm<sup>2</sup> attivano il 90% dei recettori)

### □ non ha un organo sensoriale localizzato, ma il polpastrello può essere visto come tale

- misura la forza applicata (3 componenti)
- svolge un ruolo importante nel controllo della presa, rilevando gli eventi fondamentali:
  - le vibrazioni (legate agli scivolamenti) (frequenza 400Hz)
  - il contatto con l'oggetto
  - il contatto dell'oggetto con altri oggetti